

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO ROBERTO CHRISTAKIS COSTA

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM SISTEMA “*PLASMA
FOCUS*” PARA GERAÇÃO DE RAIOS X**

Curitiba

2012

PAULO ROBERTO CHRISTAKIS COSTA

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM SISTEMA “*PLASMA
FOCUS*” PARA GERAÇÃO DE RAIOS X**

Dissertação apresentada ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Área de concentração em Engenharia e Ciências dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

Curitiba

2012

Dedico este trabalho à minha irmã Ana Paula, ao meu irmão Carlos Fabiano, aos meus pais Elena e Evandenir por todo amor, por quem sou e por tudo que alcancei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela caminhada que ele me proporciona.

Aos meus pais, Elena e Evandenir, pelo amor, apoio e incentivo.

Aos meus irmãos, Carlos Fabiano e Ana Paula, pela amizade, coragem, dedicação e incentivo.

Em especial, ao meu orientador Prof^o. Dr^o. Vitoldo Swinka Filho, pela sua objetividade, honestidade, conhecimentos, experiências e oportunidades para fazer deste estudo uma aplicação real.

Ao meu amigo Walmor Cardoso Godoi pelas orientações, ensinamentos, apoio e sugestões para o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores das disciplinas que complementaram meus conhecimentos, Prof. Dr. Edemir Luiz Kowalski, Prof. Dr. Guilherme Cunha da Silva, Prof. Dr. Ramón S. Cortés Paredes, Profa. Dra. Lucimara Stolz Roman, Profa. Dra. Marilda Munaro, Prof. Dr. Paulo César de Camargo, Profa. Dra. Claudia Eliana Marino Zarbin e Prof. Dr. Fernando Whypych.

A Comissão Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelos subsídios para a importação, constantes da Lei 8010/90.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, pelo financiamento e infraestrutura para a condução deste projeto de pesquisa.

Ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE.

Aos funcionários do PIPE pela presteza e dedicação na solução de todas as minhas dúvidas e solicitações.

À Universidade Federal do Paraná, UFPR.

A todos aqueles que me apoiaram e acreditaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

“Há pessoas que mantêm o caminho da excelência muito claro em suas mentes. Nada pode bloquear a passagem deles porque eles têm direito à vitória. Todo dia é como se eles removessem a camada de neve que cobre o caminho. Enquanto caminhando eles nunca se abalam ou abalam os outros. Eles olham para o alto. Eles mantêm Deus à frente e ao lado. Eles só tomam o único suporte do único Pai. Eles aprenderam que a arte mais importante é colocar um ponto final no passado. O segredo, segundo eles, é ver tudo como um grande jogo e se divertir.”

B.K. David

“Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez”.

Jean Cocteau

RESUMO

Neste trabalho é mostrado a construção e a caracterização elétrica de um sistema “*plasma focus*” para a geração de raios X. Foi construído com uma célula de material acrílico de formato cilíndrico com um eletrodo central de cobre (ânodo), doze eletrodos periféricos de aço (cátodo) e duas conexões, uma para controle do vácuo e outra para injeção do gás de trabalho. No arranjo experimental do sistema foram integrados os equipamentos de vácuo, capacitor, fonte de alta tensão, ponta de prova de alta tensão, sensor de corrente, sensor de corrente tipo bobina de Rogowski, chave *spark gap* e sistema de aquisição de dados. Para o funcionamento do sistema e caracterização elétrica da célula construída, um capacitor, com energia previamente armazenada, foi rapidamente chaveado nos eletrodos da célula. A descarga do capacitor começa na base do eletrodo central (ânodo), onde há um isolador, de forma multifilamentar e simétrica gerando um campo magnético. Este impulsiona o plasma até o final do ânodo onde é submetida uma fase conhecida como colapso. A caracterização permitiu a determinação e análise dos parâmetros elétricos do sistema.

Palavras-Chave: Sistema “*plasma focus*”; Geração de raios X; Caracterização elétrica da célula construída; Parâmetros elétricos do sistema.

ABSTRACT

In this work it is shown the construction and electrical characterization of a system plasma focus system for X-ray generation. The system has the Mather's type geometry. It was built with an acrylic cell with cylindrical form with a central electrode (anode), twelve peripherals steel electrodes (cathode) and with two connections, one for air removal and another for gas injection. The experimental setup is integrated equipment composed of the vacuum system, capacitor, high voltage power supplies, passive high-voltage probes, current transformers, current transformers (Rogowski's coil type), spark gap key and acquisition system. The electrical characterization was made by a capacitor with energy previously stored and rapidly switched in the electrode's cell. The discharge started at the base of the central electrode (anode), where there is an insulator, of the continuous form and symmetric generating a magnetic field. This plasma boosted until the end of anode in which was subjected a phase that's known collapse. The characterization and analysis allowed the determination of electrical parameters of the system.

Key Words: Plasma focus system; X-ray generation; Electrical Characterization of the cell constructed; Electrical parameters of the system

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	CÉLULAS DO SISTEMA “ <i>PLASMA FOCUS</i> ” (a) GEOMETRIA PADRÃO DO TIPO MATHER e (b) GEOMETRIA PADRÃO DO TIPO FILIPPOV	5
FIGURA 2 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA “ <i>PLASMA FOCUS</i> ” TIPO MATHER	6
FIGURA 3 -	GEOMETRIA ESTUDADA POR MATHER	7
FIGURA 4 -	GEOMETRIA DESENVOLVIDA PELA <i>AEROSPACE CORPORATION</i>	7
FIGURA 5 -	GEOMETRIA ELABORADA POR MAKEEV	8
FIGURA 6 -	FASES DE DESCARGA DO SISTEMA	9
FIGURA 7 -	IMAGEM DA FASE DE RUPTURA	10
FIGURA 8 -	CAMADA INICIAL DO PLASMA ENTRE O ISOLADOR – INÍCIO DA FASE DE DECAIMENTO E FASE DE ACELERAÇÃO	11
FIGURA 9 -	CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSÃO DA FORÇA MAGNÉTICA	12
FIGURA 10 -	CARACTERIZAÇÃO FINAL DA FASE DE RUPTURA E INÍCIO DA FASE DE ACELERAÇÃO	12
FIGURA 11 -	FASE DE ACELERAÇÃO AXIAL	13
FIGURA 12 -	FASE DE COMPRESSÃO RADIAL	14
FIGURA 13 -	FASE DE COLAPSO	15
FIGURA 14 -	SINAL DE di/dt DA BOBINA DE ROGOWSKI – FASES DE UMA DESCARGA	15
FIGURA 15 -	SINAL di/dt DA BOBINA DE ROGOWSKI – CARACTERÍSTICAS DO PULSO CORRESPONDENDO AO EFEITO <i>PINCH</i>	16
FIGURA 16 -	SEQUÊNCIA DA DINÂMICA DO PLASMA NO SISTEMA – (a) ANTES DO EFEITO <i>PINCH</i> , (b) EFEITO <i>PINCH</i> e (c) DEPOIS DO EFEITO <i>PINCH</i>	17
FIGURA 17 -	(a) MONTAGEM EXPERIMENTAL, (b) IMAGENS OBTIDAS APÓS UMA DESCARGA	18
FIGURA 18 -	(a) IMAGEM RADIOGRÁFICA DE UM ROLAMENTO DE ESFERA DE AÇO INOXIDÁVEL – ESTÁTICO E ROTATIVO, (b)	

	IMAGEM RADIOGRÁFICA DE UMA TURBINA DE ALUMÍNIO, ESTÁTICA E RÁPIDA ROTAÇÃO	20
FIGURA 19 -	ARRANJO EXPERIMENTAL COM DETECTOR DE RADIAÇÃO	21
FIGURA 20 -	<i>SOFTWARE</i> DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA “ <i>PLASMA FOCUS</i> ”	22
FIGURA 21 -	(a) ELETRODO DO DISPOSITIVO COM A CÂMARA DE DESCARGA REMOVIDA, (b) FOTOGRAFIA DA DESCARGA TIRADA COM A CÂMARA USUAL – PONTOS BRILHANTES ACIMA DO ÂNODO CORRESPONDEM A PULSOS SUCESSIVOS DE DESCARGA E (c) PARTE SUPERIOR DA CÂMARA DO DISPOSITIVO COM A PORTA NA SUA PARTE SUPERIOR PARA COLOCAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	23
FIGURA 22 -	(a) BOMBA DE VÁCUO MECÂNICA, (b) SENSOR PIRANIO, (c) MULTÍMETRO, (d) FONTE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA E (e) APARATO EXPERIMENTAL PARA TESTE DE VÁCUO NA CÉLULA	24
FIGURA 23 -	(a) CAPACITOR E (b) CHAVE <i>SPARK GAP</i>	25
FIGURA 24 -	FONTE DE TENSÃO DC <i>MATSUNADA</i> MODELO AU-50P12-L(220 V)	25
FIGURA 25 -	PONTA DE PROVA DE ALTA TENSÃO <i>TEKTRONIX</i> P6015A	26
FIGURA 26 -	SENSOR DE CORRENTE	26
FIGURA 27 -	SENSOR DE CORRENTE TIPO BOBINA DE ROGOWSKI	27
FIGURA 28 -	GERADOR DE FUNÇÃO MINIPA MODELO MFG-4200	27
FIGURA 29 -	(a) OSCILOSCÓPIO <i>TEKTRONIX</i> TDS 2024, (b) <i>INTERFACE GPIB</i> , (c) TELA DO <i>SOFTWARE TEKTRONIX – OPENCHOICE DESKTOP</i> e (d) CASADOR DE IMPEDÂNCIA	28
FIGURA 30 -	DEPENDÊNCIA DO GÁS DO SENSOR DE VÁCUO APG-M	29
FIGURA 31 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE FOTOS DO SISTEMA	30
FIGURA 32 -	CIRCUITO DO DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO	32
FIGURA 33 -	DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO NO EXPERIMENTO	33
FIGURA 34 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA CALIBRAÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE CORRENTE <i>BERGOZ</i>	34
FIGURA 35 -	ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DO SINAL	

	DO SENSOR DE CORRENTE <i>BERGOZ</i>	35
FIGURA 36 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS DE CORRENTE <i>BERGOZ</i> E TIPO BOBINA DE ROGOWSKI	37
FIGURA 37 -	ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS DE CORRENTE <i>BERGOZ</i> E TIPO BOBINA DE ROGOWSKI	37
FIGURA 38 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL DO SISTEMA “ <i>PLASMA FOCUS</i> ”	38
FIGURA 39 -	CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO SISTEMA “ <i>PLASMA FOCUS</i> ”. RESISTÊNCIA (R_p) E INDUTÂNCIA (L_p) DO PLASMA VARIANDO COM O TEMPO. TENSÃO DO PLASMA (V_p) MEDIDA ENTRE O ÂNODO E CÁTODO	40
FIGURA 40 -	RESPOSTA NATURAL DO CIRCUITO RLC	41
FIGURA 41 -	RESPOSTA SUBAMORTECIDO DO CIRCUITO RLC	42
FIGURA 42 -	CIRCUITO SIMULADO NO <i>SOFTWARE MULTISIM</i>	44
FIGURA 43 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA VERIFICAR A INDUTÂNCIA INTERNA DO CAPACITOR	46
FIGURA 44 -	CIRCUITO EQUIVALENTE PARA VERIFICAR A INDUTÂNCIA INTERNA DO CAPACITOR	46
FIGURA 45 -	REPRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA INDUTÂNCIA NA CÉLULA	48
FIGURA 46 -	ALTURA TOTAL E INFORMAÇÕES DA ESTRUTURA DA CÉLULA	49
FIGURA 47 -	DIÂMETRO DA CÉLULA	50
FIGURA 48 -	MEDIDAS E INFORMAÇÕES DO ISOLADOR E DO ÂNODO	50
FIGURA 49 -	MEDIDAS E INFORMAÇÕES DO CÁTODO	51
FIGURA 50 -	FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DOS SENSORES DE CORRENTE	52
FIGURA 51 -	FORMA DE ONDA DA CORRENTE, TENSÃO E DERIVADA DA CORRENTE PARA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS DOS SENSORES DE CORRENTE MARCA <i>BERGOZ</i> E TIPO BOBINA DE ROGOWSKI	54
FIGURA 52 -	FORMA DE ONDA DO SINAL DA CORRENTE UTILIZADO	

	PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA	56
FIGURA 53 -	FORMA DE ONDA DO SINAL DA TENSÃO	56
FIGURA 54 -	AJUSTE NÃO LINEAR EXPONENCIAL DO SINAL DA CORRENTE – PARÂMETRO α COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO CIRCUITO RLC SÉRIE EXPERIMENTAL	57
FIGURA 55 -	AJUSTE NÃO LINEAR EXPONENCIAL – PARÂMETRO α COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO CIRCUITO RLC SÉRIE SIMULADO	60
FIGURA 56 -	a) SINAL DA DERIVADA DA CORRENTE, (b) SINAL DA TENSÃO e (c) SINAL DA CORRENTE	65
FIGURA 57 -	FOTOS DO EXPERIMENTO	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	FATOR DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE	53
TABELA 2 -	VALORES EXPERIMENTAIS E SIMULADOS	62
TABELA 3 -	ANEXO 1 - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA CÉLULA	74
TABELA 4 -	ANEXO 2 - INFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO	75
TABELA 5 -	ANEXO 3 - INFORMAÇÕES DO ARGÔNIO	76
TABELA 6 -	ANEXO 4 - INFORMAÇÕES DO AR ATMOSFÉRICO SECO	77

LISTA DE SIGLAS

ISPF	<i>Software Interactive System Productivity Facility</i>
EEDF	Função de distribuição de energia de elétrons
TULIP	<i>Turning Linac for Protontherapy</i>
RADPFVV5. 013.9b	<i>Software de simulação do sistema “plasma focus”</i>
DC	Corrente elétrica contínua
END	Ensaio não destrutivo
RLC	Circuito resistência-indutância-capacitância
RC	Circuito resistência-capacitância
CH1	Canal 1 do osciloscópio
CH2	Canal 2 do osciloscópio
CH3	Canal 3 do osciloscópio
GPB	<i>General Purpose Interface Bus – Interface de dados</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

X	símbolo usado em ciência para designar o desconhecido
\vec{J}	vetor densidade de corrente elétrica
\vec{F}	vetor força magnética induzida
i_p	corrente elétrica do plasma
\vec{B}	vetor campo magnético
\overrightarrow{dL}	distância radial entre o ânodo e cátodo
μ_o	permeabilidade magnética do vácuo
F_r	componente axial da força magnética induzida
F_z	componente radial da força magnética induzida
\vec{J}_z	componente axial da densidade da corrente elétrica
B_θ	campo magnético induzido
l	comprimento do eletrodo interno
r	raio do eletrodo interno
$\overrightarrow{d\theta}$	variação angular conforme componente axial e radial
p	pressão do gás inerte de trabalho
α	coeficiente de amortecimento exponencial
V_o	tensão elétrica de carga do capacitor
L_o	indutância elétrica do circuito
$L_{capacitor}$	indutância elétrica do capacitor
$L_{célula}$	indutância elétrica da célula
R_o	resistência elétrica inicial do sistema
C_o	capacitância elétrica do capacitor
R_p	resistência elétrica do plasma
L_p	indutância elétrica do plasma
V_p	tensão elétrica no plasma
w_d	frequência angular de amortecimento
w_n	frequência angular natural
T	período de oscilação completa
f	frequência de oscilação
E_o	energia armazenada no capacitor

Z_o	Impedância elétrica do circuito
z_o	comprimento do eletrodo interno (ânodo)
a	raio interno do ânodo
b	raio interno do cátodo
$T_{1/4}$	um quarto do período de oscilação completa
f_{ajuste}	fator de ajuste do sensor de corrente elétrica
$f_{ajustedr}$	novo fator de ajuste do sensor de corrente elétrica com divisor resistivo
$V_{entrada}$	tensão elétrica de entrada
$V_{saída1}$	tensão elétrica de saída um
$V_{saída2}$	tensão elétrica de saída dois
R_1	resistência elétrica um
R_2	resistência elétrica dois
V	tensão elétrica do circuito
$V_{máxima}$	tensão elétrica máxima
V_{DIRETA}	tensão elétrica direta
V_{DESVIO}	tensão elétrica do desvio
I_{DIRETA}	corrente elétrica direta
I_{DESVIO}	corrente elétrica do desvio
K_{FATOR}	fator de ajuste da calibração do sensor de corrente elétrica
Σ	Somatório
K	relação de amplitude de pulso de tensão medido
V_1	Válvula de pressão um
V_2	Válvula de pressão dois

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SIGLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Visão geral	1
1.2 Objetivo geral	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Estrutura do trabalho	2
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Raios X	4
2.2 Geometria do sistema “ <i>plasma focus</i> ”: história e desenvolvimento	5
2.3 Fases de descarga	8
2.3.1 Fase de ruptura (camada inicial do plasma)	9
2.3.2 Fase de aceleração axial	12
2.3.3 Fase de compressão	14
2.3.4 Fase de colapso	14
2.4 Estado da arte: evolução tecnológica	17
3 PARTE EXPERIMENTAL	24
3.1 Materiais e equipamentos	24
3.1.1 Sistema de vácuo	24
3.1.2 Dispositivo de armazenamento de energia e chave <i>spark gap</i>	25
3.1.3 Fonte de alta tensão DC	25
3.1.4 Ponta de prova de alta tensão	26
3.1.5 Sensor de corrente	26
3.1.6 Sensor de corrente tipo bobina de Rogowski	27
3.1.7 Gerador de função	27

3.1.8	Sistema de aquisição e análise	28
3.1.9	Ar e gás de trabalho	28
3.1.10	Diagrama esquemático de fotos do sistema	29
3.2	Métodos experimentais	31
3.2.1	Metodologia geral	31
3.2.2	Calibração do sensor de corrente marca <i>Bergoz</i>	32
3.2.3	Calibração da resposta dos sensores de corrente marca <i>Bergoz</i>	33
3.2.4	Calibração da resposta dos sensores de corrente marca <i>Bergoz</i> e tipo bobina de Rogowski	36
3.2.5	Determinação dos parâmetros elétricos do sistema “ <i>plasma focus</i> ”	38
3.2.6	Determinação da indutância do circuito	40
3.2.7	Simulação da indutância do circuito	44
3.2.8	Determinação da indutância interna do capacitor	45
3.2.9	Determinação da indutância da célula	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Construção da célula	49
4.2	Fator de ajuste de calibração do sensor de corrente marca <i>Bergoz</i> com divisor resistivo	51
4.3	Fator de ajuste de calibração da resposta do sensor de corrente	52
4.4	Fator de ajuste de calibração da resposta dos sensores de corrente marca <i>Bergoz</i> e tipo bobina de Rogowski	53
4.5	Parâmetros elétricos da célula – experimental	55
4.6	Parâmetros elétricos da célula – simulação	60
4.7	Indutância interna do capacitor	63
4.8	Indutância da célula	63
4.9	Indutância do sistema (circuito, capacitor, célula)	64
4.10	Efeito <i>pinch</i>	64
5	CONCLUSÕES	67
	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	68

REFERÊNCIAS	69
ANEXOS	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 VISÃO GERAL

Em meados do século XIX o médico Johannes Evangelista Purkinje introduziu o conceito da palavra grega “plasma” para designar “um fluido claro que é obtido quando o sangue é limpo de seus vários corpúsculos”. Meio século depois, em 1922 o engenheiro e cientista Irving Langmuir propôs uma analogia entre um fluido eletrificado, que carrega elétrons, íons e nêutrons e o plasma sanguíneo, que carrega corpúsculos vermelhos, brancos e germes [1, 2]. A continuação do estudo de Langmuir envolvendo descargas elétricas nos gases resultou na primeira noção de “plasma” como sendo o quarto estado da matéria. Langmuir chamou o gás ionizado de “plasma” pela primeira vez em 1927 e então, a palavra “plasma” foi primeiramente introduzida na literatura científica para designar “uma região com um gás brilhante e ionizado produzido pela descarga elétrica em um tubo”. Na época a definição de plasma foi melhorada e passou a ser um sistema de partículas cujo comportamento coletivo é caracterizado por interações de cargas elétricas medidas em coulombs [1, 3, 4, 5].

O plasma é gerado pelo processo de ionização do gás onde elétrons, átomos livres e moléculas neutras sofrem colisões inelásticas. Ele pode ser produzido em laboratório usando várias técnicas, como uma descarga de plasma no vácuo (*Vaccum spark*) [6, 7, 8]; um plasma aquecido e confinado pelo campo magnético gerado pela sua própria corrente elétrica (Efeito *pinch*) [9, 10, 11, 12] e o sistema para geração de raios X, elétrons, íons e nêutrons (*Plasma focus*) [13, 14].

O sistema “*plasma focus*” é uma alternativa interessante para fontes comercialmente disponíveis de geração de raios X, pois permite a geração de pulsos de raios X no intervalo de 10 a 100 ns, o que também possibilita a realização de radiografias de amostras em movimento.

Podem ser aplicados em radiografias de amostras biológicas, objetos estáticos como peças pequenas feitas de diferentes materiais, objetos dinâmicos como uma roda de carro, terapias de radiação médica, radiologia industrial, ensaios não destrutivos, etc.

No Brasil até o presente momento não existem grupos de pesquisa trabalhando no desenvolvimento e aplicação desta tecnologia.

1.2 OBJETIVO GERAL

Construir e realizar a caracterização elétrica de uma célula “plasma focus” para geração de raios X com aplicação na engenharia e ciência dos materiais.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma célula “*plasma focus*” de formato cilíndrico com um eletrodo central de cobre (ânodo), doze eletrodos periféricos de aço (cátodo) e com duas conexões, uma para a retirada do ar e outra para injeção do gás de trabalho.
- Montar o arranjo experimental do sistema, integrado com o equipamento de vácuo, capacitor, fonte de alta tensão, chave *spark gap* e sistema de aquisição de dados.
- Determinar e analisar os parâmetros elétricos do sistema desenvolvido.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste trabalho é mostrado a construção e a caracterização elétrica de um sistema “*plasma focus*”. Neste capítulo tem-se uma breve introdução do assunto, a justificativa, o objetivo geral e específico do trabalho. No capítulo 2, intitulado “Revisão da Literatura” é fornecido todo o embasamento teórico relativo ao desenvolvimento do sistema, bem como, as geometrias existentes, as fases de descarga e o estado da arte com as aplicações do sistema. No capítulo 3, serão apresentados os materiais e métodos para a realização do experimento, como construção da célula, utilização dos instrumentos e equipamentos para as medidas, método de calibração do sensor de corrente, método de calibração da resposta dos sensores para pulsos de corrente, métodos para determinação dos parâmetros elétricos do sistema, montagem do arranjo experimental, circuito elétrico equivalente ao sistema, método para determinação da indutância do circuito, método para determinação da indutância interna do capacitor, cálculo da indutância da célula, ar

e gás de trabalho. No capítulo 4, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no experimento, os quais estão devidamente concluídos no capítulo 5. Como sugestão, serão apresentadas propostas para trabalhos futuros que darão continuidade à pesquisa desenvolvida.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RAIOS X

Os raios X são ondas eletromagnéticas de alta energia e foram descobertos pelo físico alemão Wilhelm Konrad Röntgen no outono de 1895 quando era professor de física do Instituto de Física da Universidade de Würzburg e por esta descoberta ele ganhou o Prêmio Nobel em Física em 1901 [15]. Costuma-se dizer que essa descoberta foi feita por acaso, e a contribuição de Röntgen foi à percepção da existência de uma radiação ainda não conhecida [16]. Os raios X têm comprimentos de onda da ordem de grandeza do angström (10^{-10} m) e com energias que variam entre alguns quilos elétron-volt a algumas centenas de quilo elétron-volt. A geração desta energia se deve à transição de elétrons nos átomos, ou à desaceleração de partículas carregadas. A descoberta ocorreu quando Röntgen inicialmente estudava o fenômeno de luminescência produzido por raios catódicos num tubo de Crookes com o objetivo de observar se os raios propagavam-se para fora do tubo. Após este experimento ele constatou que devido à intensa luminosidade não era possível visualizar os raios. Röntgen fez uma nova experiência envolvendo o tubo de Crookes com um papelão de cor preta, e ficou observando o tubo enquanto aplicava descargas elétricas entre os eletrodos do equipamento. Ele percebeu que quando ligava o tubo, uma placa de material fluorescente chamado platino-cianeto de bário que se encontrava perto do tubo, brilhava. Röntgen constatou que o efeito de fluorescência era devido à emissão de algum tipo de radiação produzida pelo tubo de raios catódicos. Desconhecendo a natureza de tais raios, denominou-os raios X [17,18]. As propriedades descritas por Röntgen mostravam que os raios X produzem luz numa tela fluorescente; enegrecem um filme fotográfico; produzem o efeito fotoelétrico em superfícies metálicas; tornam condutores o ar e outros gases; sua absorção depende do peso atômico do absorvedor, pois os elementos de elevado peso atômico apresentam uma absorção mais acentuada do que os de baixo peso atômico; são espalhados; não são desviados por campos elétricos e magnéticos. [19, 20]. Dentre outros geradores de raios X pode-se citar propriamente o tubo de raios X que acelera um feixe de elétrons contra um alvo metálico; um feixe de raios laser que é uma fonte compacta de raios X que emite radiação de forma totalmente direcional e concentrada, um

acelerador linear que além de emitir raios X, pode emitir feixes de elétrons com várias energias.

2.2 GEOMETRIA DO SISTEMA “PLASMA FOCUS”: HISTÓRIA E DESENVOLVIMENTO

A geometria do sistema “*plasma focus*” foi descoberta independentemente pelo Professor Dr. Nikolai V. Filippov no Instituto *Kurchatov* de Energia atômica, Moscou, Rússia e pelo Professor Dr. Joe W. Mather no laboratório Científico de *Los Alamos*, Estados Unidos da América. Ambos, no início da década de 60 [21, 22]. Para as duas geometrias, tipo Filippov e tipo Mather, há uma câmara aberta composta por dois eletrodos, o interno (ânodo) e o externo (cátodo), separados por um isolador, que caracterizam a célula do sistema, conforme é mostrada na FIGURA 1 [23].

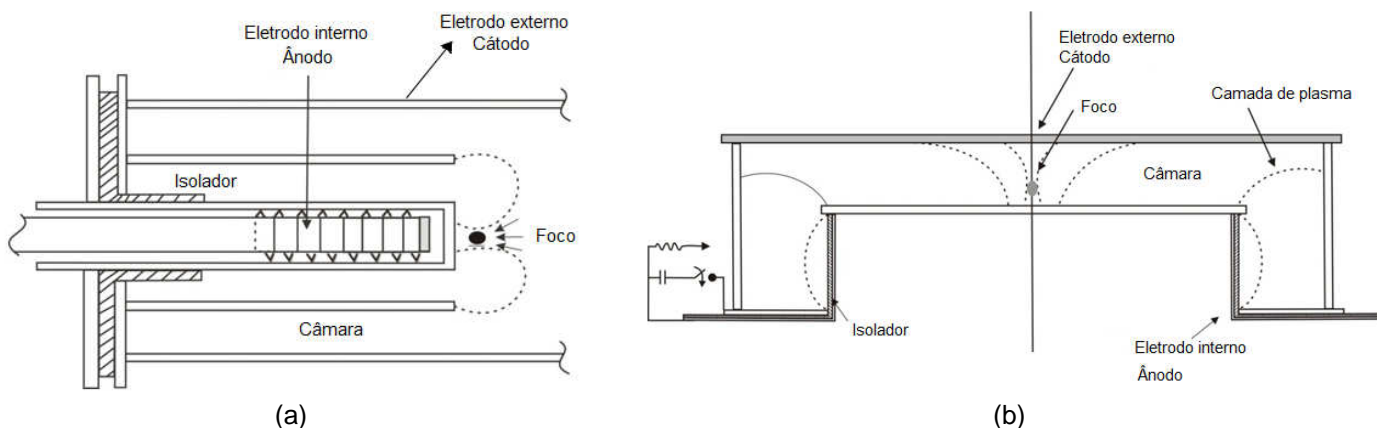


FIGURA 1 – CÉLULAS DO SISTEMA “PLASMA FOCUS” (a) GEOMETRIA PADRÃO DO TIPO MATHER e (b) GEOMETRIA PADRÃO DO TIPO FILIPPOV [22].

Mather enquanto estudava e fazia experiências com sua geometria padrão, descobriu que poderia gerar plasma de forma simétrica envolvendo o isolador, e que este plasma seria formado entre o eletrodo interno e o eletrodo externo e sua concentração seria em um foco localizado na ponta (centro) do eletrodo interno. Esta experiência mostrou a Mather que a estabilidade e a concentração do plasma no foco geravam radiação [22, 23].

No caso a geometria de Filippov, a mesma se apresenta com uma diferença marcante em comparação com a geometria de Mather: a ausência de eletrodos coligados para acelerar o plasma. O plasma é gerado da mesma forma como no sistema de Mather (iniciando-se no isolador), mas no sistema de Filippov a aceleração deve ser mais acentuada para que o foco de plasma possa ser concentrado e estabilizado. Entretanto, as duas geometrias produzem resultados semelhantes [22, 23].

Na FIGURA 2 tem-se o desenho esquemático do sistema tipo Mather utilizado no estudo e no experimento deste trabalho.

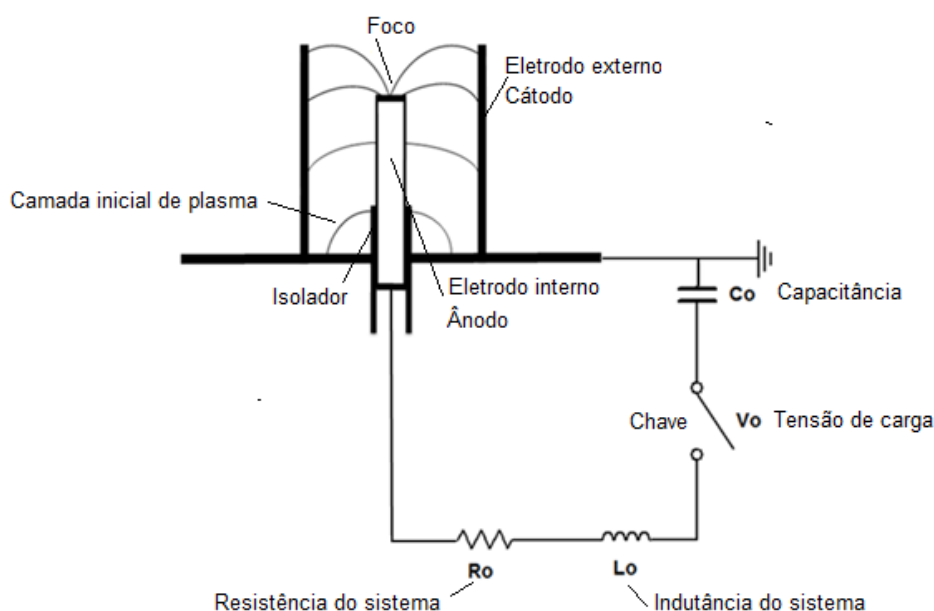


FIGURA 2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA “PLASMA FOCUS” TIPO MATHER [24].

Em uma explicação básica, o sistema funciona quando um capacitor com energia previamente armazenada é chaveado rapidamente nos eletrodos da célula. Desta descarga capacitiva, tem-se a formação simétrica e contínua da camada inicial de plasma na base do isolador que envolve o eletrodo interno. O plasma inicialmente percorre o isolador e depois o eletrodo interno dando origem a um campo magnético que fará este plasma acelerar até o final dos eletrodos interno e externo [22, 23, 24, 25, 26]. A camada de plasma que atinge o final dos eletrodos se concentra na ponta (centro) do eletrodo interno e desta concentração observa-se um colapso de energia e um efeito característico que resultam na emissão de radiação.

Na FIGURA 3 tem-se outra geometria estudada por Mather, onde ele tentou estabilizar o fluxo de plasma entre os eletrodos opostamente polarizados usando duas descargas. O foco de plasma não ficou estabilizado, com nenhuma geração de radiação durante a descarga [22].

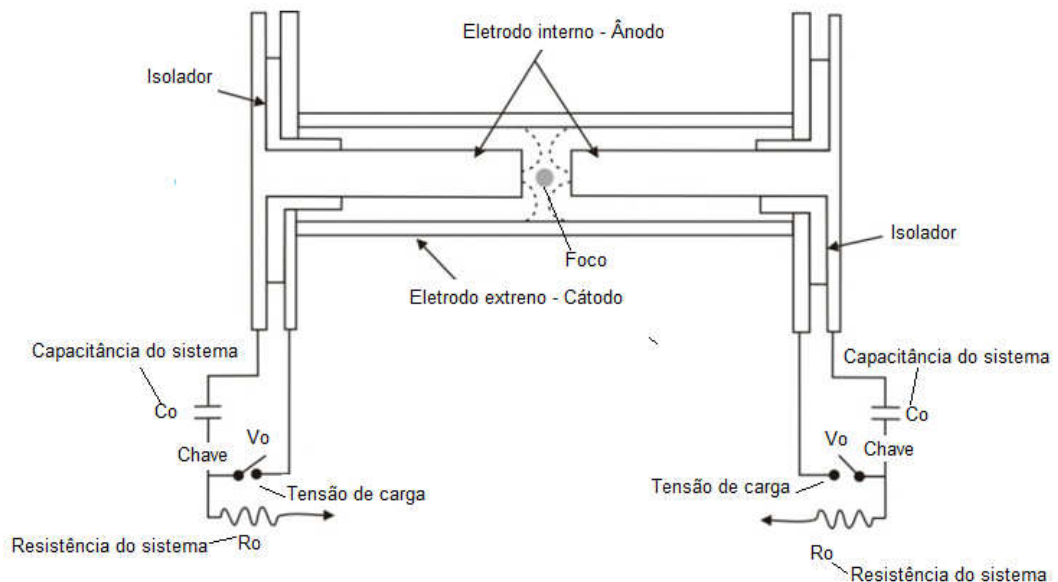


FIGURA 3 – GEOMETRIA ESTUDADA POR MATHER [22]

A FIGURA 4 mostra a geometria desenvolvida pela *Aerospace Corporation*. Usando este arranjo, esperava-se que o formato parabólico permitisse controle da baixa pressão do gás, maior compactação e compressão do plasma facilitando o disparo no foco. Esta configuração dos eletrodos não mostrou vantagem na geração de plasma, pois o mesmo não se estabilizava no foco [22].

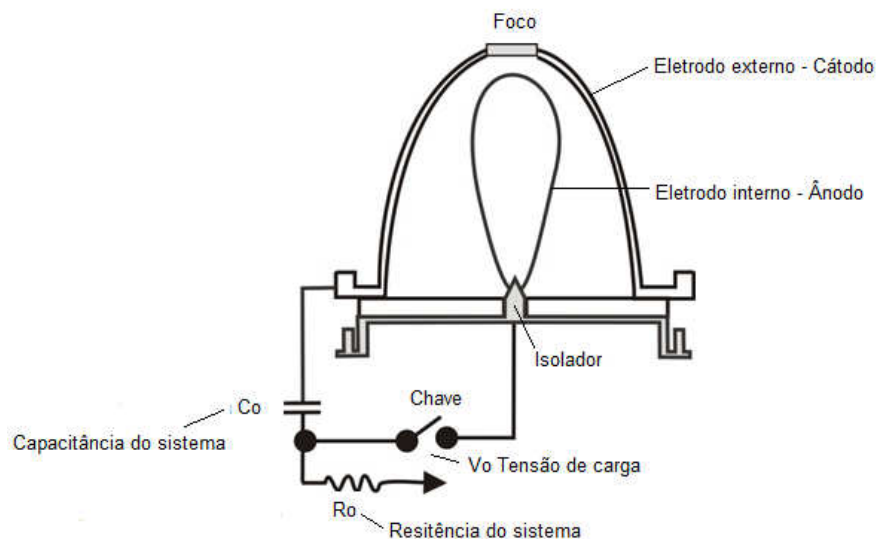


FIGURA 4 – GEOMETRIA DESENVOLVIDA PELA AEROSPACE CORPORATION [22]

Na FIGURA 5 observa-se a geometria elaborada pelo Professor Dr. N. G. Makeev no Instituto Científico de Pesquisa em Física Experimental, Sarov, Rússia. O ânodo e o cátodo são esféricos e incorporados um ao outro para possibilitar a estabilização do foco de plasma, mas a estabilização não foi observada [27].

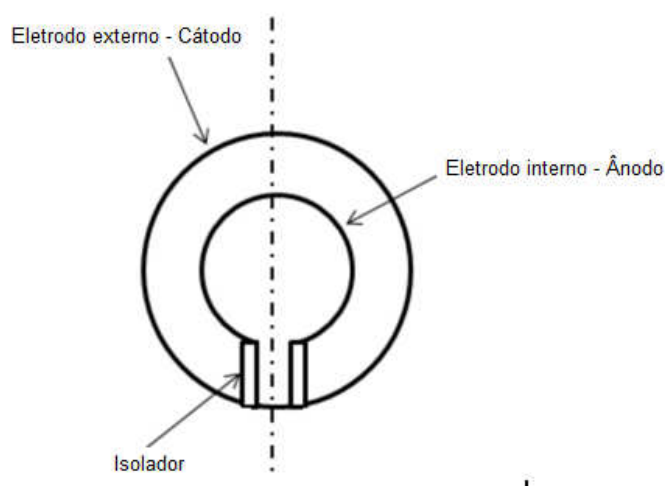


FIGURA 5 – GEOMETRIA ELABORADA POR MAKEEV [27]

2.3 FASES DE DESCARGA

O sistema “*plasma focus*” tem sido extensivamente estudado nos últimos anos, mas o mecanismo para produção de um plasma de longa duração permanece um mistério. O sistema padrão tem construção simples, mas há certos parâmetros que devem ser cuidadosamente considerados para a produção de uma descarga de plasma. A estrutura, conhecida como célula na literatura consiste em um cilindro composto por um eletrodo interno no seu centro, o ânodo, que é cercado por eletrodos externos e o cátodo [22, 23].

Normalmente, os eletrodos são de material de alta condutividade como cobre ou latão e ficam no interior da célula. A separação dos dois eletrodos em uma das extremidades é feita com um isolador dielétrico que pode ser de vidro tipo *Pyrex*® ou material cerâmico. A pressão no interior da célula é controlada e isto facilita a geração de um pulso de alta tensão que é aplicado entre os eletrodos. A ruptura do gás ocorre no isolador e conforme a geometria do sistema, esta ruptura inicial e a camada de plasma que percorrerá o ânodo serão simétricos (por igual ao

redor do isolador e ânodo). A fase inicial da geração do plasma é chamada de fase de ruptura. Após esta fase, tem-se a formação de uma camada de plasma, que é acelerada pela força magnética ao longo do eixo dos eletrodos interno (ânodo) e externo (cátodo). Esta fase é chamada de fase de aceleração. Quando a camada de plasma atinge a extremidade final do eletrodo interno, forças magnéticas fazem com que esta camada se comprima. Esta compressão tem formato pontiagudo com localização a poucos centímetros do final do eletrodo central. Esta é a fase final, chamada de colapso ou efeito *pinch* [22, 28, 29].

Na FIGURA 6, tem-se a geometria padrão tipo Mather com as fases de descarga.

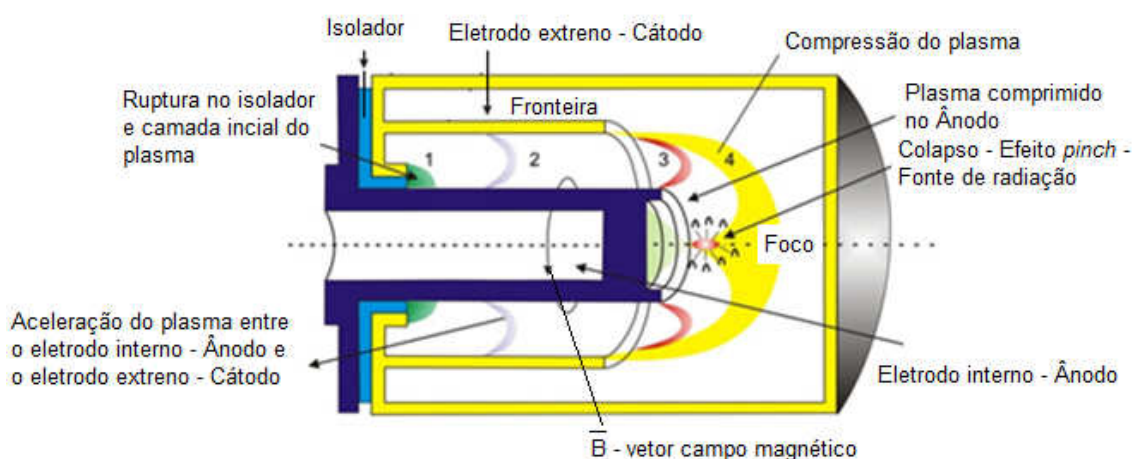


FIGURA 6 – FASES DE DESCARGA DO SISTEMA [30]

As fases de descarga se caracterizam como a fase inicial que é a de ruptura, a fase de aceleração entre os eletrodos interno e externo, a fase de compressão no foco no eletrodo interno e a fase de colapso ou explosão.

2.3.1 FASE DE RUPTURA (CAMADA INICIAL DO PLASMA)

Desenvolve-se a partir do eletrodo central, ao longo do isolador, quando é aplicada a alta tensão entre os eletrodos da célula, conforme visto na FIGURA 6 e na imagem da FIGURA 7. A camada inicial de plasma, que se forma pelo processo de ionização das colisões inelásticas das partículas do gás, se concentra ao redor do isolador. O resultado é um padrão de luminosidade radial e simétrico (ao redor do isolador), que tem duração de nanossegundos, após aplicação da tensão de descarga. À medida que a corrente elétrica no eletrodo aumenta, o plasma ao redor

do isolador começa a se mover radialmente alcançando o final do isolador chegando ao eletrodo interno - ânodo e também ao eletrodo externo – cátodo, que é conhecido como fronteira na célula. Nesta transição, do isolador para os eletrodos da célula, tem-se um efeito inicial conhecido como inverso. Porque, de acordo com a força magnética de Lorentz, a camada de plasma se expande em vez de se comprimir e, como há uma corrente elétrica circulando em uma distância radial pequena neste isolador, ela cria um campo magnético. Na transição para os eletrodos, esta corrente passa a circular por uma distância radial maior criando um campo magnético mais intenso que contribuirá para força magnética acelerando o plasma até o final dos eletrodos [22, 23, 31].

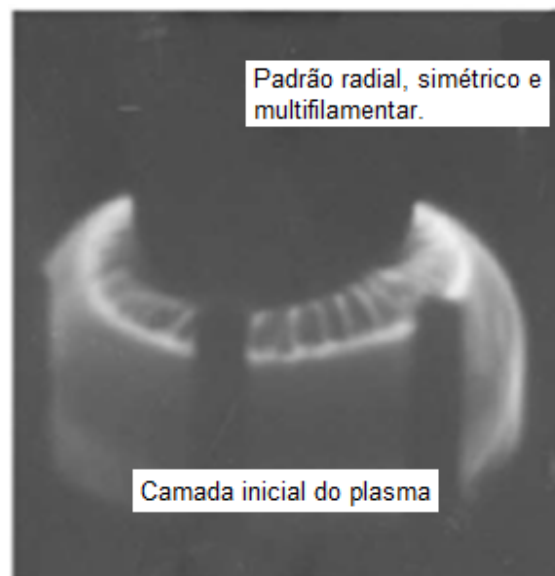


FIGURA 7 – IMAGEM DA FASE DE RUPTURA [32]

Na FIGURA 8 é mostrada a camada inicial do plasma entre o isolador e a fase de aceleração. Quando ocorre a ruptura, o plasma carrega corrente elétrica que é indicada pelo símbolo \vec{j} . A corrente flui através do plasma na superfície do isolador, que envolve a região do eletrodo interno para a fronteira, isto é, o eletrodo externo. Esta corrente produz um fluxo de campo magnético de acordo com a equação de Maxwell,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_o i_p \quad (1)$$

O campo magnético induzido pela corrente de plasma flui ao longo do isolador e por sua vez, cria uma força magnética que age sobre este mesmo plasma de acordo com a equação de força de Lorentz,

$$\vec{F} = \int i_p d\vec{L} \times \vec{B} \quad (2)$$

onde \vec{F} é o vetor força magnética induzida de Lorentz, i_p é a corrente elétrica no plasma, \vec{B} é vetor campo magnético, $d\vec{L}$ é o vetor que representa a variação da distância percorrida pelo plasma no isolador e entre os eletrodos interno e extremo (fronteira) e μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo [22, 23, 31].

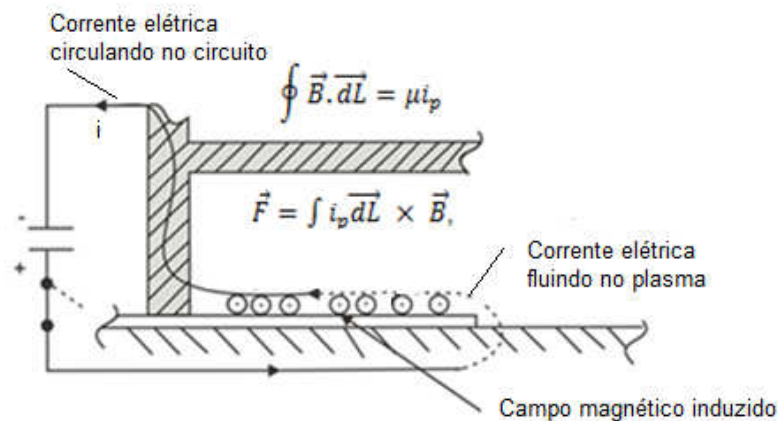


FIGURA 8 – CAMADA INICIAL DO PLASMA ENTRE O ISOLADOR – INÍCIO DA FASE DE ACELERAÇÃO [22]

A força magnética se expande perpendicularmente ao eletrodo interno em direção ao eletrodo externo (fronteira) fazendo com que o plasma acelere entre os eletrodos, como mostrado pela FIGURA 9. Esta expansão perpendicular de plasma continua ao longo da fronteira até que o plasma atinge o eletrodo exterior [22, 28, 29].

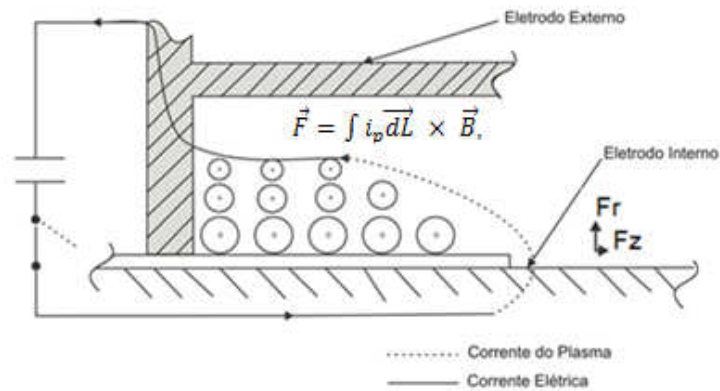


FIGURA 9 – CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSÃO DA FORÇA MAGNÉTICA [22]

Na FIGURA 10 é mostrada a caracterização final da fase de ruptura, pois há o início da fase de aceleração do plasma ao longo dos eletrodos da célula.

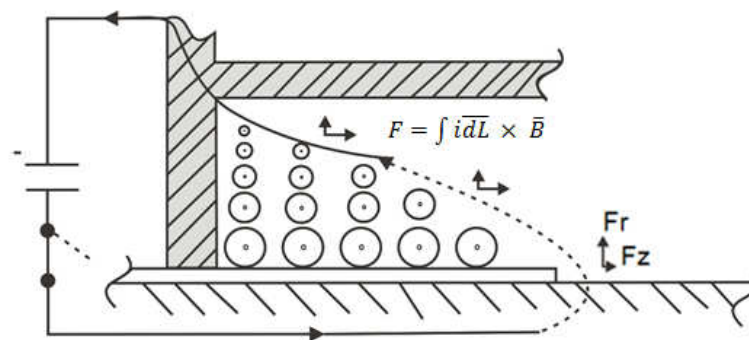


FIGURA 10 – CARACTERIZAÇÃO FINAL DA FASE DE RUPTURA E INÍCIO DA FASE DE ACELERAÇÃO [22]

2.3.2 FASE DE ACELERAÇÃO AXIAL

Começa na camada inicial simétrica de plasma, formada durante a fase de ruptura, obedecendo às distâncias existentes entre o eletrodo interno e eletrodo externo. A camada de plasma sofre o efeito inverso na transição do isolador para o eletrodo interno, pois há uma expansão do plasma que acelera em direção ao eletrodo exterior. Este efeito ocorre devido à forma do isolador, mas como a camada de plasma é acelerada junto ao eletrodo interno, ela se mantém devido à dependência radial da força magnética de Lorentz [22, 23]. Na FIGURA 11 é mostrada uma imagem da fase inicial de aceleração do plasma.

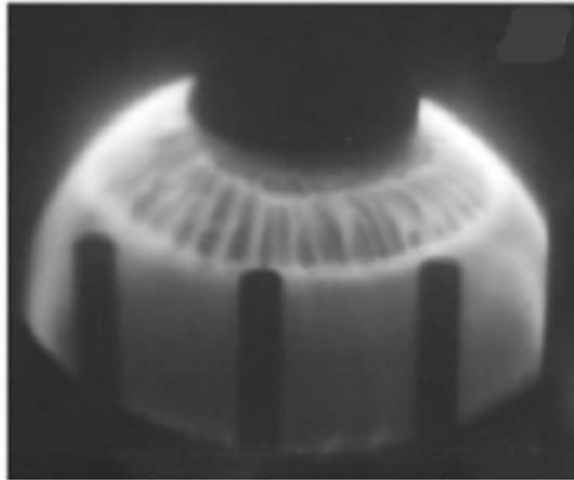


FIGURA 11 – FASE DE ACELERAÇÃO AXIAL [32]

A camada de plasma tem uma componente radial, o vetor força magnética induzida F_r e uma componente axial, o vetor força magnética induzida \vec{F}_z que está na direção do eletrodo interno. A força da componente radial é composta por $(\vec{J}_z \times \vec{B}_\theta)_r$ onde \vec{J}_z é o componente axial da corrente e \vec{B}_θ é o vetor campo magnético induzido. Esta força é perpendicular e força a camada de plasma contra a superfície do eletrodo exterior. A força de aceleração axial é $(\vec{J}_z \times \vec{B}_\theta)_z$ que varia no razão comprimento e raio (l/r) em todo o anel do eletrodo interno, resultando em velocidades maiores da camada de plasma junto a ele [28, 29, 32].

A dependência radial do campo magnético decorre da relação de caminho percorrido, conforme equação (1) onde $d\vec{L} = r d\vec{\theta}$, assim,

$$\int_0^{2\pi} r d\vec{\theta} \vec{B}_\theta = \mu i_p \quad (3)$$

e

$$\vec{B}_\theta \approx i_p / r \quad (4)$$

A força $(\vec{J} \times \vec{B})$ nos limites do eletrodo interno revela que a força axial é muito mais forte do que a força radial. No eletrodo externo, a situação é invertida com uma força radial mais forte. Assim, a camada de plasma, no limite do eletrodo

externo, tende a ter uma aceleração axial menor do que no eletrodo interno levando a uma efeito de desvio. Também, uma vez que depende do comprimento e do raio, na razão (l/r), as forças no eletrodo exterior são ainda mais reduzidas, levando a mais desvio [22, 23].

2.3.3 FASE DE COMPRESSÃO

A compressão do plasma faz com que grande parte do gás ionizado que foi arrastado pela camada de plasma seja perdida nesta fase. Estima-se que no foco de plasma concentre somente 10% (dez por cento) do gás injetado na célula. Mesmo com uma quantidade de gás relativamente pequena, o efeito de compressão é talvez a maneira mais eficiente de aquecimento do plasma, conforme ilustrados nas imagens da FIGURA 12 [22, 23].

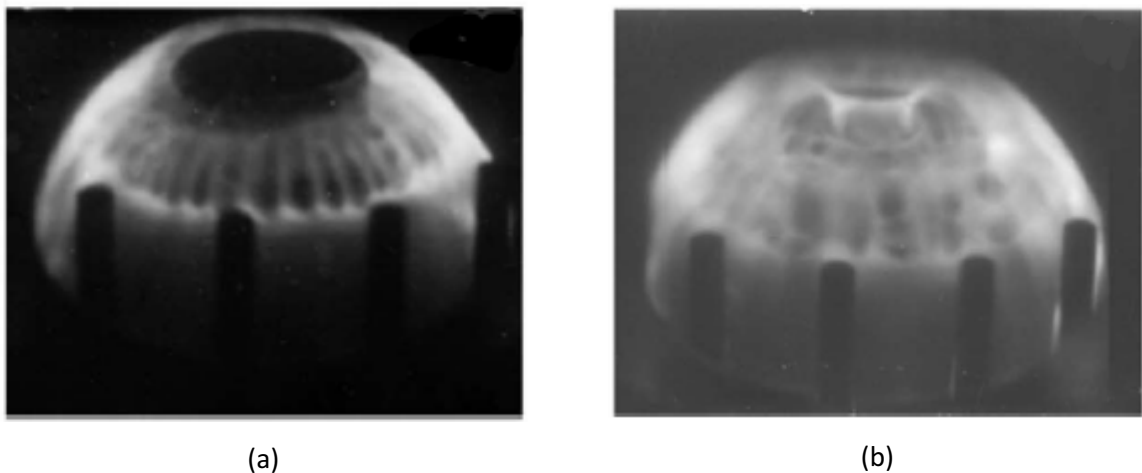


FIGURA 12 – FASE DE COMPRESSÃO – (a) e (b) [32]

2.3.4 FASE DE COLAPSO

Caracteriza-se pela formação de uma coluna de plasma ao longo do eixo central, pelo crescimento de instabilidades do campo magnético e pela dissolução do plasma, conforme visto na imagem da FIGURA 13. Nesta fase tem-se a caracterização do efeito *pinch* e a emissão de radiação [22,23].

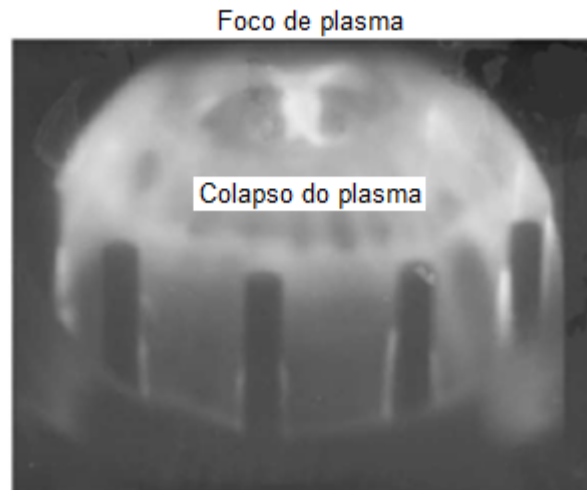


FIGURA 13 – FASE DE COLAPSO [32]

Na FIGURA 14 são mostradas imagens de uma descarga no sistema. Observa-se que a densidade da luz é uniforme em quase todas as fases do sinal da derivada em função do tempo.

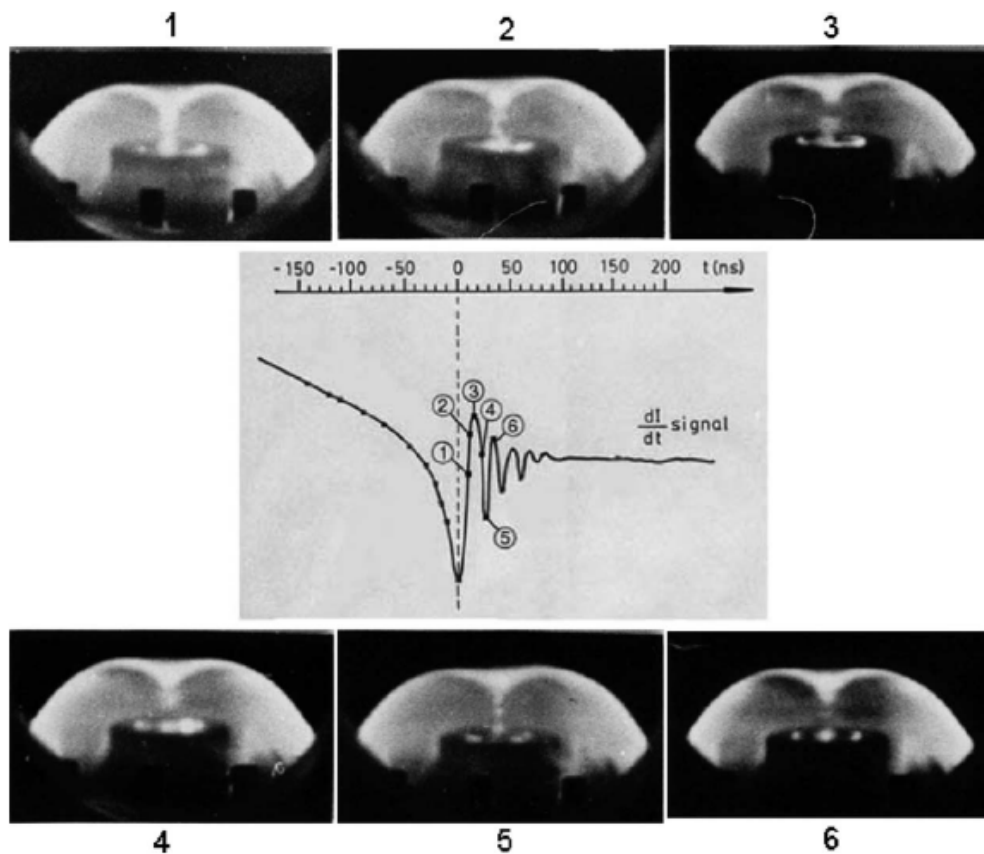


FIGURA 14 – SINAL DE $\frac{dI}{dt}$ DA CORRENTE (BOBINA DE ROGOWSKI) – FASES DE UMA DESCARGA [32]

Na fase de colapso também se observa o efeito *pinch*, conforme mostrado na FIGURA 15 com o sinal típico de $\frac{dI}{dt}$ da bobina de Rogowski e outro sinal de um monitor do pulso. No início do sinal $\frac{dI}{dt}$ tem-se a fase de ruptura, quando há a formação da camada inicial do plasma e começo da fase de aceleração no eixo axial. É observado também o sinal de resposta do circuito resistência-indutância-capacitância (RLC). Aproximadamente a um quarto do período (pouco mais de 1 μ s), a corrente tem valor máximo e após alguns nanosegundos depois (entre 100 e 200 ns), é observado um pulso no sinal de $\frac{dI}{dt}$ que indica uma rápida variação na indutância formada no conjunto dos doze eletrodos externos – cátodo da célula devido à compressão da coluna de plasma que caracteriza o pulso que corresponde ao efeito *pinch* [32].

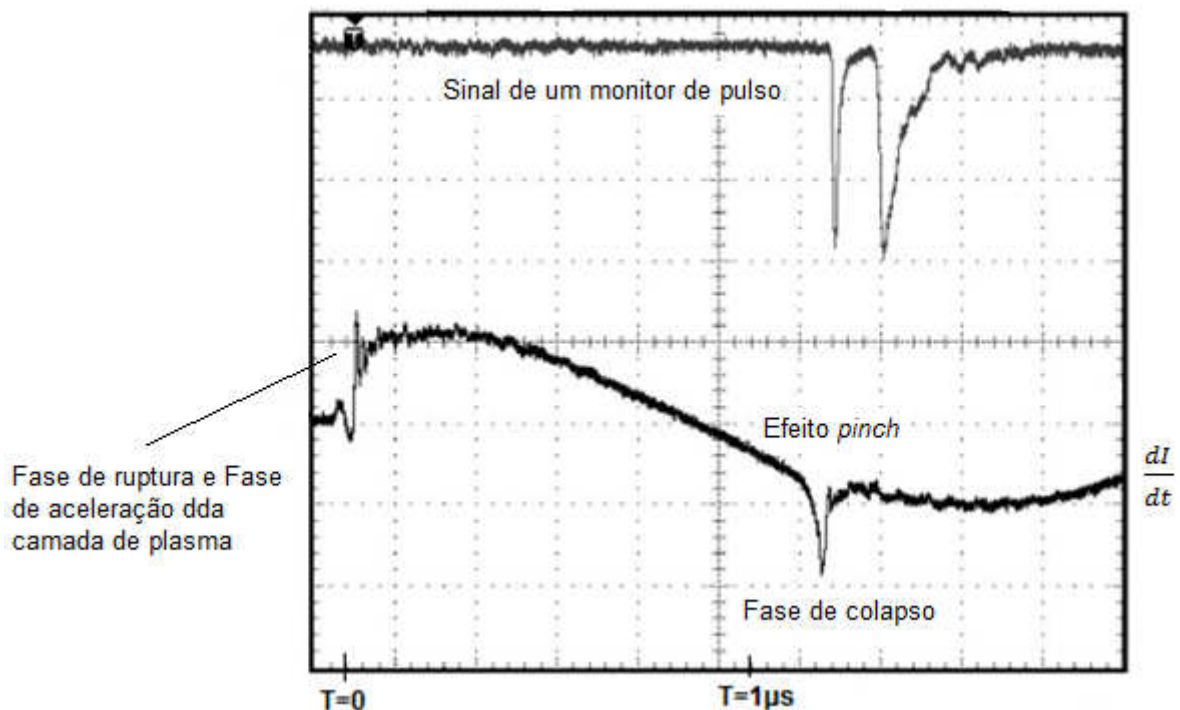


FIGURA 15 – SINAL $\frac{dI}{dt}$ DA CORRENTE (BOBINA DE ROGOWSKI) – CARACTERÍSTICA DO PULSO CORRESPONDENDO AO EFEITO *PINCH* [32]

Na FIGURA 16 é mostrada a sequência da dinâmica do plasma no sistema até a fase de colapso onde se observa o efeito *pinch* [33].

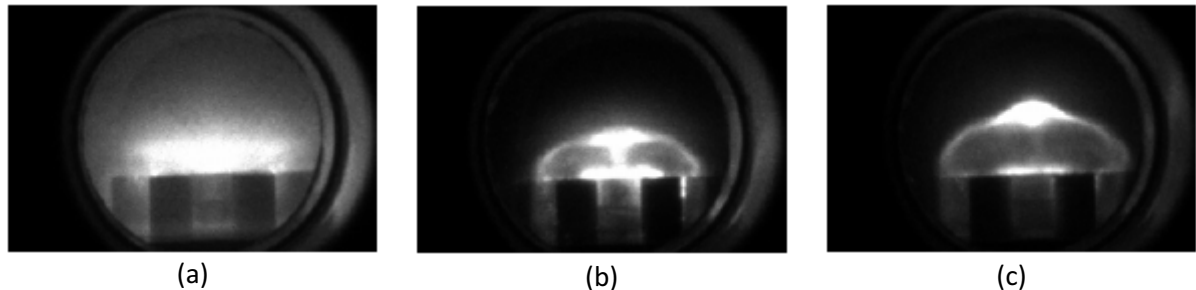


FIGURA 16 – SEQUÊNCIA DA DINÂMICA DO PLASMA NO SISTEMA – (a) ANTES DO EFEITO *PINCH*, (b) EFEITO *PINCH* e (c) DEPOIS DO EFEITO *PINCH* [33]

2.4 ESTADO DA ARTE: EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Mather [34] durante a sua investigação inicial do sistema “*plasma focus*” analisou a energia armazenada, o controle da pressão interna da célula, a descarga no sistema, a estabilização do plasma e o gás inerte de trabalho, bem como, estudou a densidade do plasma formado no eletrodo central. A experiência contribuiu para os estudos futuros da geração de raios X usando o sistema.

Mather et. al. [35] introduziram o estudo do sistema “*plasma focus*” como um acelerador de plasma que envolve o armazenamento de energia e depois o movimento da camada de plasma dentro da célula e, além disso, de uma conversão parcial desta energia em energia de plasma durante o efeito característico chamado *pinch*. No modelo físico estudado, a energia é condensada e dividida em energia cinética e energia interna no interior da célula. A energia é armazenada indutivamente atrás da camada de plasma. Somente uma fração da energia mecânica é observada no efeito *pinch* como energia do plasma. O funcionamento, como acelerador de plasma, é rápido de acordo com o ajuste da tensão aplicada, controle da pressão do gás e das dimensões da célula.

Gary [36] investigou a aceleração dos íons no sistema “*plasma focus*” estudando o comportamento do campo elétrico e do campo magnético. Usando a Lei de Ohm, foi obtida a corrente elétrica que flui no plasma, bem como, foram usados

os campos elétricos para calcular os íons orbitais e as acelerações resultantes. O modelo utilizado foi limitado e não se provou que o campo elétrico induzido produz íons de grande energia. A resistividade elétrica da célula levou a difusão da corrente, e assim a um campo magnético e elétrico dentro do plasma.

Filippov et. *al.* [37] investigaram, através de experimentos, as características dos raios X emitidos no sistema “*plasma focus*”, pois o sistema seria usado como fontes de teste no desempenho de alguns dispositivos eletrônicos estudados, na esterilização de grandes quantidades de alimentos e na destruição de material orgânico. Os experimentos foram realizados utilizando o *software Interactive System Productivity Facility (ISPF)* em conjuntos com a estrutura tipo Filippov no Instituto Kurchatov.

Da Re et. *al.* [38] estudaram o sistema “*plasma focus*” tipo Mather em uso no departamento de física da Universidade de Ferrara com as seguintes características: eletrodo de comprimento 130 mm, diâmetro externo do eletrodo de 107 mm, diâmetro interno do eletrodo de 34 mm com duas câmaras cilíndricas de vácuo, uma com 8 cm de diâmetro e a outra com 14 cm de diâmetro. As câmaras são simétricas e posicionadas 200 mm a partir do eixo dos eletrodos em relação ao foco, conforme visto na FIGURA 17 a. Cada câmara contém um filme radiográfico com um sistema de filtragem. Após a irradiação, as imagens dos filmes foram digitalizadas e analisadas, conforme visto na FIGURA 17 b, mostrando que a estrutura do sistema pode ser adaptada para diversos tipos de experimentos.

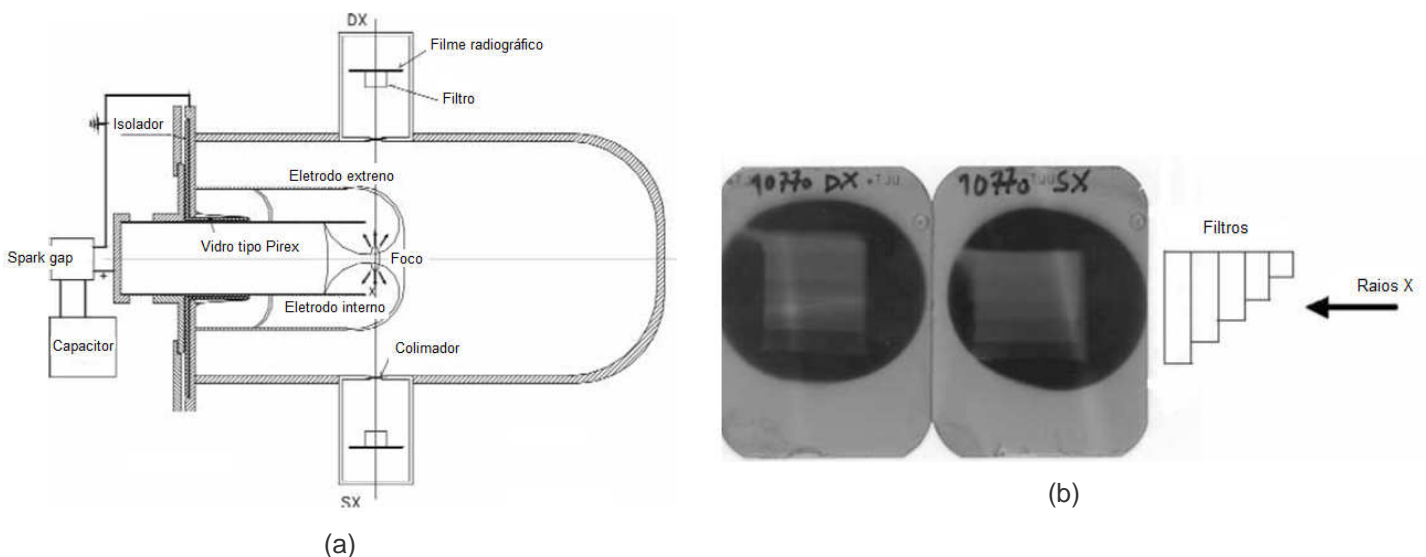


FIGURA 17 – (a) MONTAGEM EXPERIMENTAL, (b) IMAGENS OBTIDAS APÓS UMA DESCARGA [38]

Yardonov et. al. [39] estudaram a fase de descarga no sistema “*plasma focus*” analisando os princípios físicos existentes no funcionamento como a estrutura magnética, a Lei de Gauss para campos magnéticos, Equações de Maxwell para o fluxo elétrico variável induzindo um campo magnético e as correntes de deslocamento.

Ivanov et. al. [40] estudaram os reatores termonucleares com confinamento magnético de plasma. O sistema “*plasma focus*” pode ser usado para testar materiais e elementos de construção para o uso nos reatores termonucleares futuros, além de estudar os parâmetros dos fluxos de plasma e seus efeitos. O estudo foi conduzido no complexo “*Turning Linac for Protontherapy*” (TULIP) do Parque Nacional Instituto de Física Lebedev.

Raspa et. al. [41] usaram imagens de objetos metálicos para demonstrar a viabilidade da utilização do sistema “*plasma focus*” para obter radiografias em amostras industriais. Este é o caminho para aplicações inovadoras de tecnologia de plasma em ensaios não destrutivos de materiais, tais como a detecção de tensões dinâmicas em defeitos. O procedimento se mostrou simples, barato e de fácil investigação. Uma questão interessante é a dependência da energia dos raios X com a estrutura do sistema, tais como material do ânodo, tensão de carga, gás inerte e pressão de funcionamento. Um pequeno sistema pode ser usado como uma fonte de raios X intensa para tirar radiografias claras da rápida movimentação de objetos metálicos. Devido a curta duração das emissões de raios X, cerca de 50 ns, o tempo de exposição é seis ordens de magnitude mais curtas do que o que pode ser atingido com fontes convencionais. Esta característica, juntamente com o grau de penetração da radiação, contribui para produzir imagens de raios X de alta qualidade mesmo com a movimentação de objetos metálicos, conforme mostrado nas FIGURAS 18 a e b.

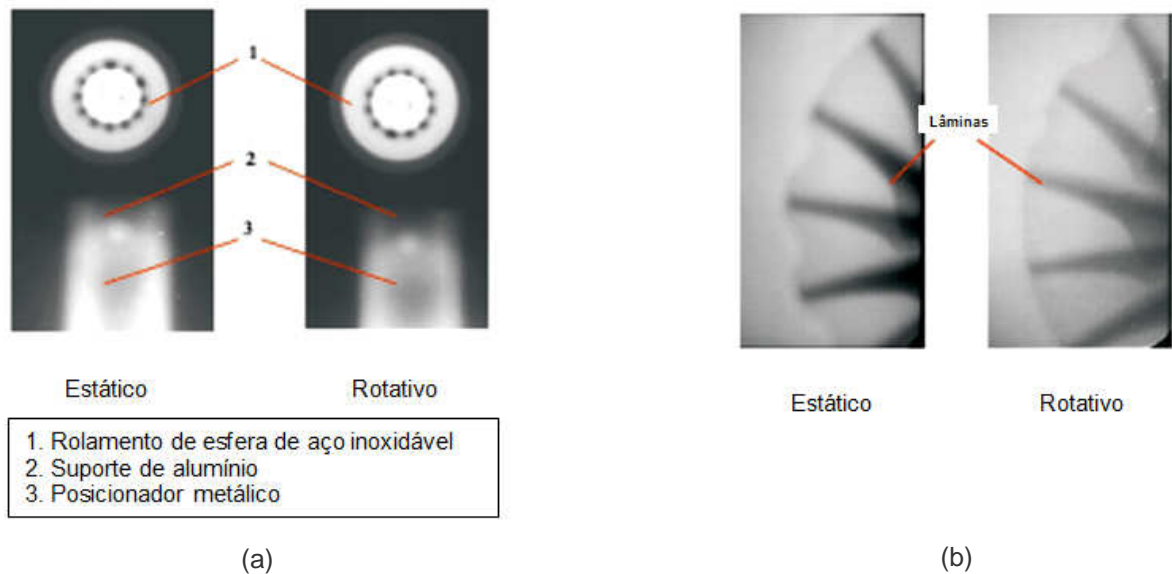


FIGURA 18 – (a) IMAGEM RADIOGRÁFICA DE UM ROLAMENTO DE ESFERA DE AÇO INOXIDÁVEL – ESTÁTICO E ROTATIVO, (b) IMAGEM RADIOGRÁFICA DE UMA TURBINA DE ALUMÍNIO – ESTÁTICO E RÁPIDA ROTAÇÃO [41]

Milanese et. al. [32] utilizaram o sistema “*plasma focus*” tipo Mather, conforme arranjo experimental mostrado na FIGURA 19. A célula contém um par de eletrodos em latão, o ânodo na parte central que está rodeado por doze eletrodos simétricos que são o cátodo. Na parte traseira da estrutura, que faz a ligação dos eletrodos, um isolador feito de vidro separa os dois eletrodos. Uma fonte de alta tensão carrega o capacitor até 31 kV. A chave *spark gap* transfere a alta tensão do capacitor para os eletrodos da célula, pois um circuito de acionamento ativa a chave *spark gap*. A experiência foi realizada com o gás inerte deutério a pressões de 1,0; 1,5 e 2,0 mbar. A descarga máxima, observado no sinal da bobina de Rogowski, foi cerca de 250 kA. O intervalo de tempo entre o início da descarga e a corrente máxima é 800 ns. A medida do feixe de nêutrons foi registrada em cada descarga com um marcador com ativação de prata, que consiste em um contador *Geiger-Müller*, envolvido em uma folha de prata com 1 mm de espessura, incluída em um bloco de parafina. Os feixes de nêutrons de 2,45 MeV emitidos em cada pulso que atravessam o bloco de parafina são controlados, pois atravessam um composto de prata e se tornam isótopo radioativo. Após decaem e emitem as radiações ionizantes que são detectadas pelo contador *Geiger-Müller*. Assim, sendo possível registrar o feixe de nêutrons em cada descarga.

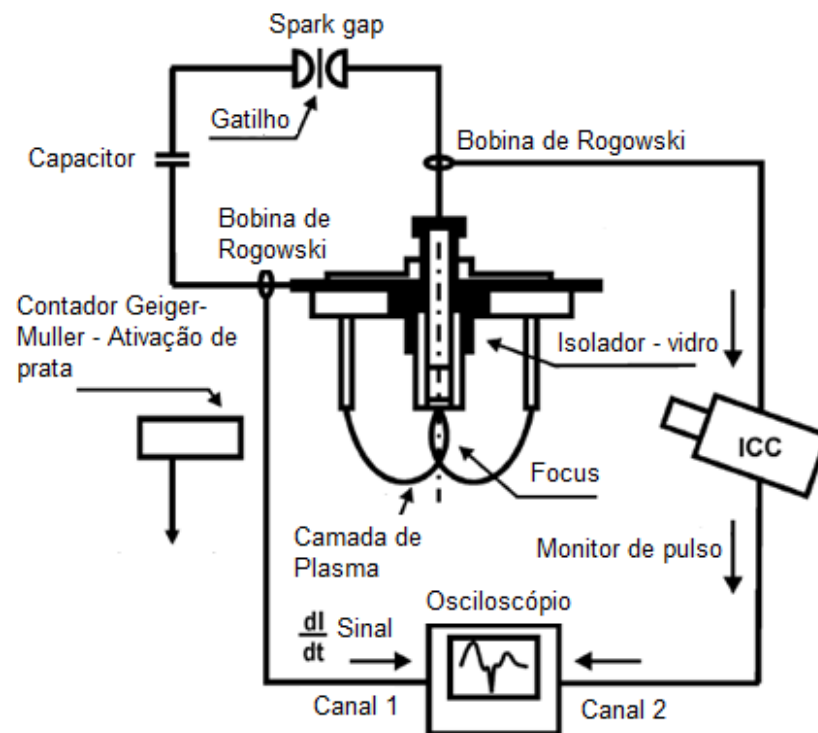


FIGURA 19 – ARRANJO EXPERIMENTAL COM DETECTOR DE RADIAÇÃO [32]

Thomas et. al. [42] trabalharam no desenvolvimento de um sistema de propulsão baseado no sistema “*plasma focus*” usando um reator de fusão com o combustível *Hydrogen-Boron-11* ($p^{11}B$). Do ponto de vista do combustível, $p^{11}B$ é vantajoso por causa da natureza da reação, que é favorável para a produção de uma descarga, pois as partículas ionizadas são concentradas devido à existência de um campo magnético.

Gribov et. al. [43] descreveram um sistema de descarga de gás utilizando o sistema “*plasma focus*” do Laboratório Multidisciplinar no Abdus Salam Centro Internacional de Física Teórica. Os estudos abordaram três direções: a) investigações do plasma magnetizado; b) fonte de nêutrons de alta energia e raios X de baixa energia para aplicação nas áreas de ciências dos materiais, controle de qualidade na medicina, etc. e c) formação de novas frentes de estudos na descarga de alta tensão no vácuo, física de plasmas, diagnósticos em raios X, espectroscopia e nêutrons [44].

Lee [45] criou o Instituto para estudos do sistema “*plasma focus*”. O método utilizado é a comunicação através da internet. O principal instrumento é o pacote de simulação baseado no modelo do Professor Sing Lee - PhD e o mais recente são a versão RADPFV5. 013.9b. Para todo o estudo, percebeu-se que as experiências

experimentos foram conduzidos com ar na faixa de operação de tensão entre 15 e 18 kV e pressão nominal na faixa de 1,0 a 2,0 mbar. A análise principal do experimento é básica e mostra o comportamento da corrente de descarga e suas variáveis e a possível emissão de raios X a partir do plasma. Os dados mostram informações típicas conhecidas da literatura para sistemas “*plasma focus*” dentro desta faixa de energia 3,0 – 5,0 kJ, conforme mostrado na FIGURA 21.

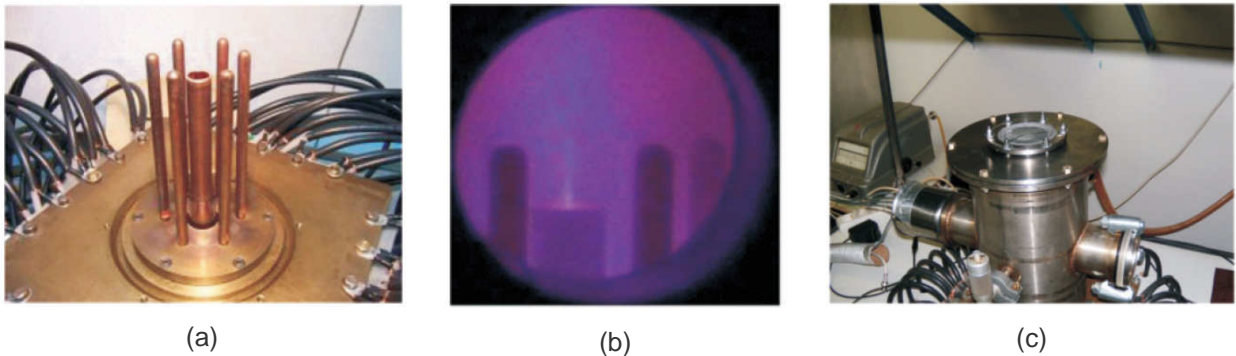


FIGURA 21 – (a) ELETRODO DO SISTEMA COM A CÂMARA DE DESCARGA REMOVIDA, (b) FOTOGRAFIA DA DESCARGA TIRADA COM UMA CÂMARA USUAL – OS PONTOS BRILHANTES ACIMA DO ÂNODO CORRESPONDEM A PULSOS SUCESSIVOS DE DESCARGA e (c) PARTE SUPERIOR DA CÂMARA DO SISTEMA COM A PORTA NA SUA PARTE SUPERIOR PARA COLOCAÇÃO DOS EXPERIMENTOS [47].

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1 SISTEMA DE VÁCUO

Os componentes do sistema são: a bomba de vácuo mecânica marca Tettex AG Instruments com escala analógica e deslocamento de ar 10 l/min, vácuo máximo com mangueira e célula de aproximadamente $1 \cdot 10^{-2}$ mbar (1 Pa) e tensão de alimentação 230 V, 60 Hz ; sensor Pirani da marca *Edwards* APG – M - NW16 – Tensão: 20 V – 36 V DC – Potência máxima: 1 W – Resistência: 1Ω – Pressão: 100 – $1 \cdot 10^{-3}$ mbar [48]; fonte de alimentação simétrica, modelo: MPC – 303 - DI – duas saídas variáveis 0-30V/0–3A DC, uma saída fixa 5V 3A DC, 110V e 220V AC e um multímetro da marca *Minipa* ET-2060 Portátil 3-1/2 dígitos, conforme mostrado na FIGURA 22.



(a)



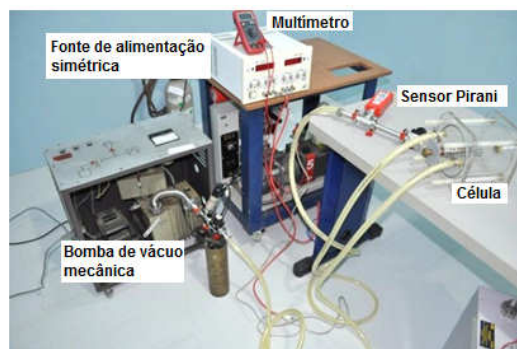
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 22 – (a) BOMBA DE VÁCUO MECÂNICA, (b) SENSOR PIRANI [48], (c) MULTÍMETRO, (d) FONTE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA E (e) APARATO EXPERIMENTAL PARA TESTE DE VÁCUO NA CÉLULA.

FONTE: O autor (2012)

3.1.2 DISPOSITIVO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA E CHAVE SPARK GAP

O dispositivo é composto por um capacitor da marca Inepar com fluido wencol II biodegradável de capacitância $1,6 \mu\text{F}/50 \text{ kV}$ controlado pelo aumento da tensão e variação da corrente elétrica na fonte, possibilitando a descarga da chave *spark gap* na célula. A chave *spark gap* é composta de dois eletrodos separados por uma distância em milímetros pré-ajustada no ar (aproximadamente 3 kV/mm). Com a chave *spark gap* no circuito, tem-se controle da energia armazenada no capacitor. Quando há a descarga na célula, a energia é liberada rapidamente rompendo a rigidez dielétrica do ar entre os eletrodos da chave. Na FIGURA 23 é mostrado o capacitor e a chave *spark gap*.

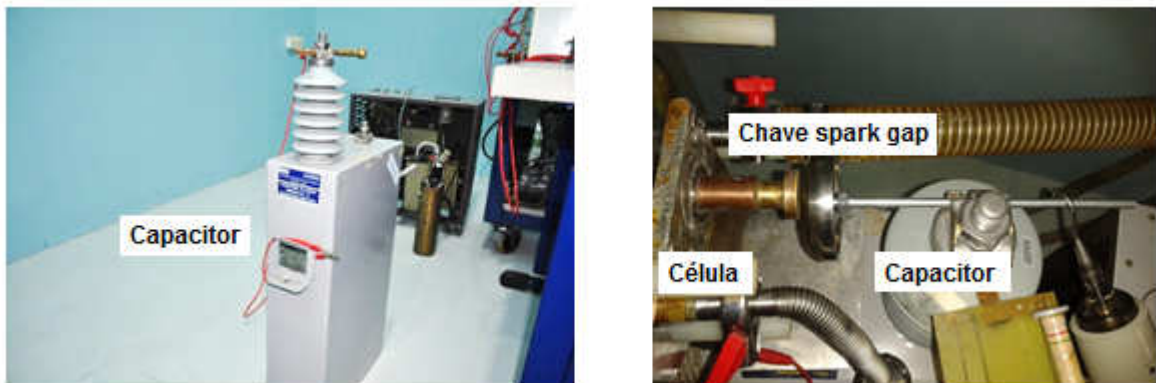


FIGURA 23 – (a) CAPACITOR E (b) CHAVE SPARK GAP
FONTE: O autor (2012)

3.1.3 FONTE DE ALTA TENSÃO DC

No circuito de carga para geração do pulso foi usada uma fonte da marca *Matsusada Precision* modelo AU-50P12-L(220 V) – saída 1 kV – 50 kV com corrente máxima de 10 mA, como pode ser visto na FIGURA 24.



FIGURA 24 – FONTE DE TENSÃO DC MATSUSADA MODELO AU-50P12-L(220 V)
FONTE: O autor (2011)

3.1.4 PONTA DE PROVA DE ALTA TENSÃO

A ponta de prova da marca *Tektronix* P6015A de $1000 \times 3,0 \text{ pF}$ $1000 \text{ M}\Omega$ com 20 KV DC, 40 KV pulso e com 100 ms de máxima duração monitorou o pico de tensão no sistema, como pode ser visto na FIGURA 25.



FIGURA 25 – PONTA DE PROVA DE TENSÃO *TEKTRONIX* P6015A
FONTE: O autor (2011)

3.1.5 SENSOR DE CORRENTE

O sensor utilizado foi da marca *Bergoz* CT-F0. 05-B com corrente máxima de 20 kA e tensão de saída para $1\text{M}\Omega$ de 0,05 V/A e para 50Ω de 0,025 V/A. Este sensor tem um semi-integrador RC e consiste de um solenóide toroidal com núcleo magnético pelo qual o campo magnético produzido pela corrente alternada neste condutor induz uma tensão proporcional na saída com a mesma forma de onda da corrente medida, conforme mostrado na FIGURA 26 [49, 50, 51, 52].



FIGURA 26 – SENSOR DE CORRENTE
FONTE: O autor (2012)

3.1.6 SENSOR DE CORRENTE TIPO BOBINA DE ROGOWSKI

O sensor de corrente foi montado com uma única espira retangular como pode ser visto na FIGURA 27 e colocado próxima à malha conectada ao ânodo da célula, pois como não é constituído com núcleo ferromagnético e não apresenta histerese nas medições realizadas. As medidas são mais precisas, pois não há perda de energia na bobina [49, 50, 51].

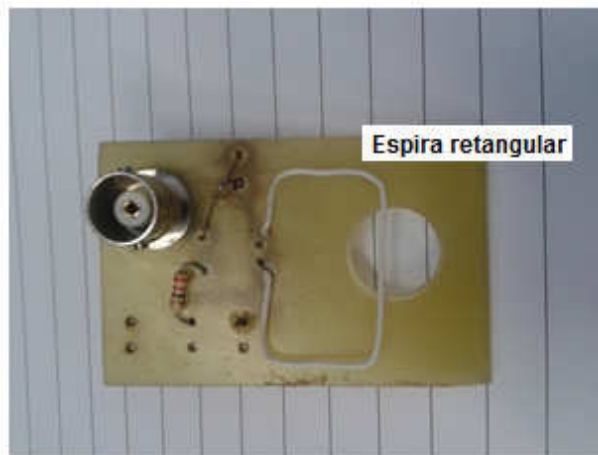


FIGURA 27 – SENSOR DE CORRENTE TIPO BOBINA DE ROGOWSKI
FONTE: O autor (2012)

3.1.7 GERADOR DE FUNÇÃO

Para auxiliar na determinação da indutância interna do capacitor foi utilizado um gerador de função da marca *Minipa*, modelo MFG-4200, como pode ser visto na FIGURA 28.



FIGURA 28 – GERADOR DE FUNÇÃO MINIPA MODELO MFG-4200
FONTE: O autor (2012)

3.1.8 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE

Todos os sinais gerados para a calibração dos sensores de corrente foram monitorados por um osciloscópio *Tektronix TDS 2024* (a) e foram enviados para um computador via *interface GPIB* (b) para análise via *software Open Choice Desktop* da *Tektronix* (c) e os dados foram transferidos para o *software Origin®* para gerar as formas de ondas a serem analisadas, conforme são mostrados na FIGURA 29.

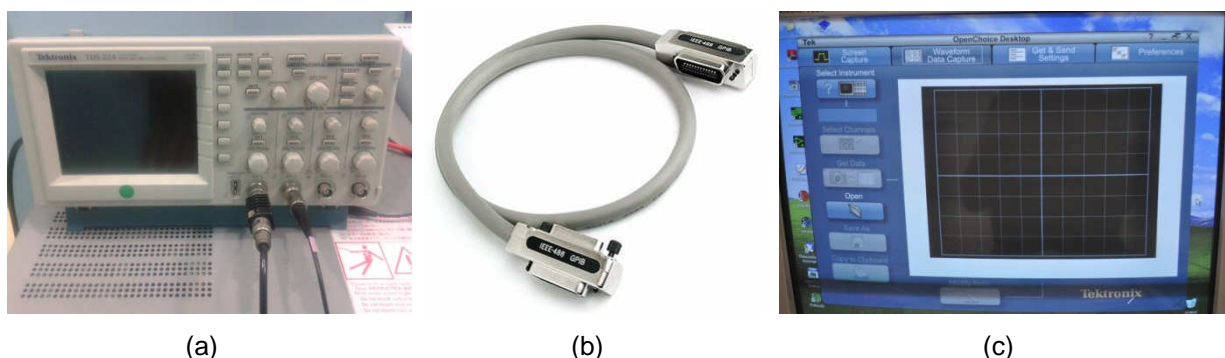


FIGURA 29 – (a) OSCILOSCÓPIO TEKTRONIX TDS 2024, (b) INTERFACE GPIB, (c) TELA DO SOFTWARE TEKTRONIX – OPENCHOICE DESKTOP
 FONTE: O autor (2012)

3.1.9 AR E GÁS INERTE DE TRABALHO

Os testes na célula foram conduzidos no ar atmosférico (ANEXO 4) [53] e com injeção do gás inerte nitrogênio e argônio.

O nitrogênio N_2 representa 78,084% da atmosfera terrestre em volume e 75,5% em peso. Por ser elemento natural da atmosfera, o nitrogênio gasoso não é, em princípio, nocivo. Mas a concentração acidental em ambientes reduz o teor de oxigênio, podendo provocar asfixia e morte. Se respirado em pressões acima de 3 bar (mergulho abaixo de 30 metros, por exemplo), tem efeito anestésico, podendo provocar a narcose de nitrogênio. Há também a dissolução no sangue e a descompressão rápida pode ser fatal devido à formação de bolhas. Nitrogênio líquido é substância criogênica e o contato com a pele pode causar graves queimaduras. Sua aplicação engloba o uso como gás dielétrico para dispositivos de alta tensão (ANEXO 2) [53].

O argônio (Ar) é inerte. A atmosfera terrestre contém 0,934% em volume e 1,29% em massa de argônio. Tanto o gás quanto o líquido são incolores e inodoros. Tem solubilidade em água similar à do oxigênio e 2,5 vezes a do nitrogênio. É um elemento inerte, não forma compostos (ANEXO 3) [53, 54].

Sabe-se que há uma dependência do gás de trabalho no uso do sensor de vácuo da marca *Edwards* APG – M - NW16 20 V – 36 V DC 1 W. O sensor é calibrado para uso em nitrogênio, e irá ler corretamente com ar atmosférico e monóxido de carbono. Para qualquer outro tipo de gás é necessário uma conversão para uma leitura da pressão correta, pois como exemplo, no caso da utilização do gás argônio, o mesmo se apresenta com a característica de maior massa, portanto mais pesado. Isso dificulta a ionização das moléculas deste gás no interior da célula. No caso do gás nitrogênio, o comportamento da ionização das moléculas é similar à ionização do ar.

A FIGURA 30 mostra a conversão para seis gases comuns: nitrogênio, argônio, dióxido de carbono, hélio, criptônio e neônio [53].

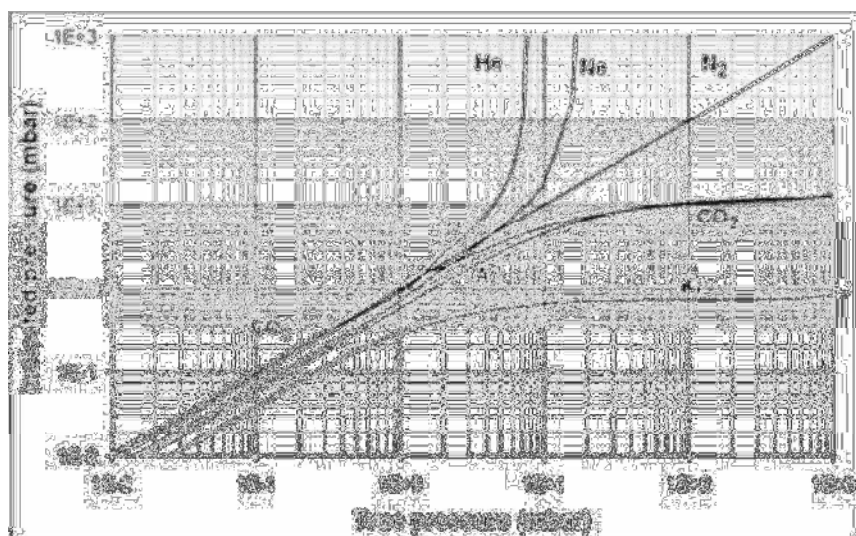


FIGURA 30 – DEPENDÊNCIA DO GÁS DO SENSOR DE VÁCUO APG-M [53]

3.1.10 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE FOTOS DO SISTEMA

Com o objetivo de mostrar todos os componentes do sistema foi montado o diagrama esquemático de fotos mostrado na FIGURA 31 e, na sequência, a descrição de cada componente.

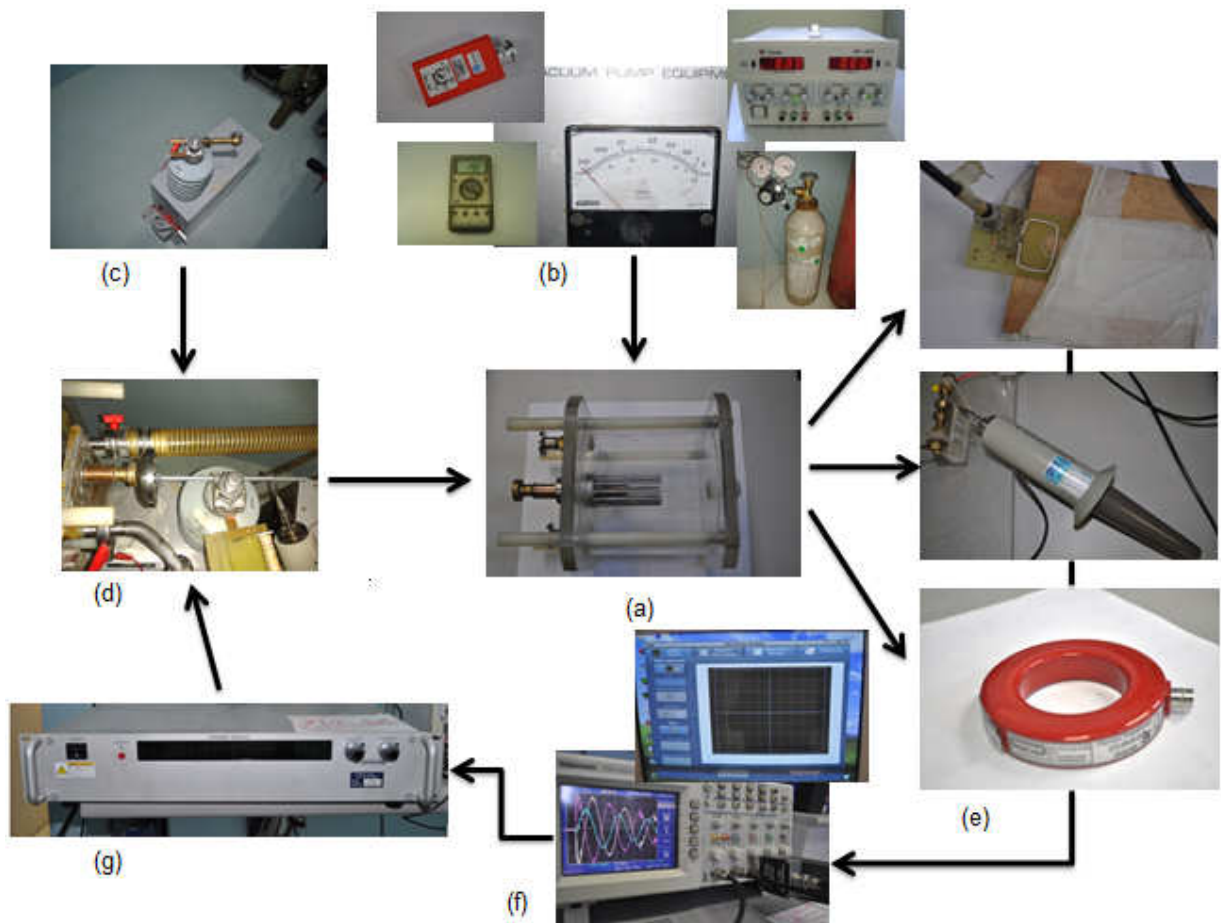


FIGURA 31 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE FOTOS DO SISTEMA.
FONTE: O autor (2012)

(a) Estrutura de acrílico em forma cilíndrica que constitui a célula com o eletrodo interno (ânodo) e o eletrodo externo (cátodo) e dois orifícios para controle da pressão interna e injeção de gás inerte de trabalho.

(b) Sistema de vácuo

- Bomba de vácuo mecânica da marca *Tettex AG Instruments*,
- Sensor de vácuo Pirani da marca *Edwards* modelo: APG – M – NW 16/20 V-36V DC/1W,
- Fonte de alimentação simétrica, modelo: MPC - 303 - DI – duas saídas variáveis 0–30V/0–3A DC, uma saída fixa 5V-3A DC, 110V e 220V AC,
- Multímetro da marca *Minipa*, modelo: ET - 2060 - Portátil 3-1/2 dígitos,
- Cilindro de gás contendo nitrogênio (N_2),

- Cilindro de gás contendo argônio (Ar),
- Válvulas reguladoras de pressão.

(c) Capacitor com capacitância total de $1,6 \mu\text{F}$ e tensão 50 kV.

(d) Chave *spark gap* de aço inox e cobre

(e) Sistema de aquisição

- Sensor de corrente marca *Bergoz* CT-F0. 05-B – corrente máxima de 20 kA e tensão de saída para $1\text{M}\Omega$ de 0,05 V/A e para 50Ω de 0,025 V/A,
- Sensor de corrente tipo bobina de Rogowski de forma retangular,
- Ponta de prova de alta tensão *Tektronix* P6015A de $1000 \times 3,0 \text{ pF}$ $1000 \text{ M}\Omega$ com 20 KV DC, 40 KV pulso e com 100 ms de máxima duração.

(f) O sistema de análise de dados contém o osciloscópio *Tektronix* TDS 2024, uma interface *GPIO*, software *Tektronix – Open Choice Desktop Application PC Communication, Origin®*, etc.

(g) A fonte de tensão DC, *Matsusada* modelo AU - 50P12 - L(220 V) – saída 1kV – 120kV e 30W – 2,2kW (saída de tensão e corrente) DC

3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 METODOLOGIA GERAL

A metodologia auxiliou a construção da célula para a montagem do sistema “*plasma focus*”, bem como, no arranjo experimental dos equipamentos do sistema de vácuo para limpeza e controle da pressão interna, capacitor, fonte de alta tensão, ponta de prova de alta tensão, sensor de corrente, sensor de corrente tipo bobina de Rogowski, chave *spark gap*, sistema de aquisição de dados com multímetro,

osciloscópio e software para tratamento dos dados e, também, a determinação dos parâmetros elétricos do sistema.

No experimento, três sinais foram registrados e analisados ($\frac{dI}{dt}$, I , V) mostrando o comportamento elétrico. Aperfeiçoando o funcionamento da célula foram alteradas as tensões de carga e a pressão do gás de trabalho. A tensão de carga do capacitor variou entre 9,0 e 20 kV e a pressão do gás no interior da célula entre 1 – 4 mbar. Os experimentos foram conduzidos primeiramente com ar e após com nitrogênio e argônio.

3.2.2 CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE

Devido a utilização no experimento de um sensor de corrente marca *Bergoz* com tensão de entrada ($V_{entrada}$) de 500 V e a corrente máxima ($I_{máxima}$) de 20 kA e um osciloscópio que tem como tensão máxima 200 V, foi necessário a colocação de um divisor resistivo ajustando a tensão a ser medida pelo osciloscópio que deve ser no máximo 200 V.

Na FIGURA 32, tem-se o circuito do divisor com dois resistores de 1500 Ω e 1000 Ω com a tensão de entrada máxima $V_{entrada} = 500$ V.

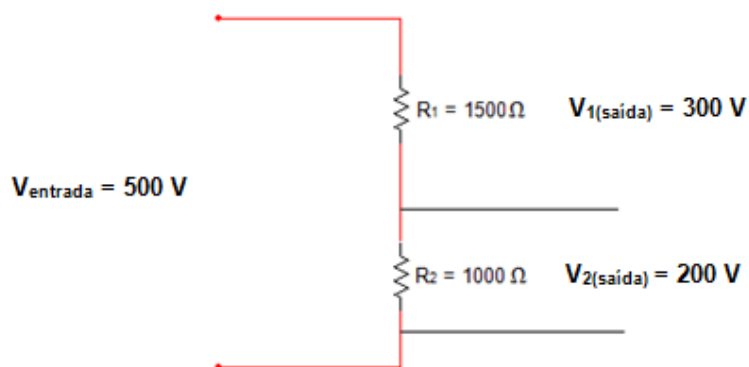


FIGURA 32 – CIRCUITO DO DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO
FONTE: O autor (2012)

Para o cálculo do fator de calibração do sensor, tem-se,

$$f_{sensor} = \frac{V_{entrada}}{i_{máxima}} \quad (1)$$

Para o novo fator de calibração do sensor, considerando a colocação do divisor resistivo, tem-se,

$$f_{sensordr} = \frac{V_{saída}}{i_{máxima}} \quad (2)$$

Na FIGURA 33 é mostrado o divisor de tensão resistivo no experimento.

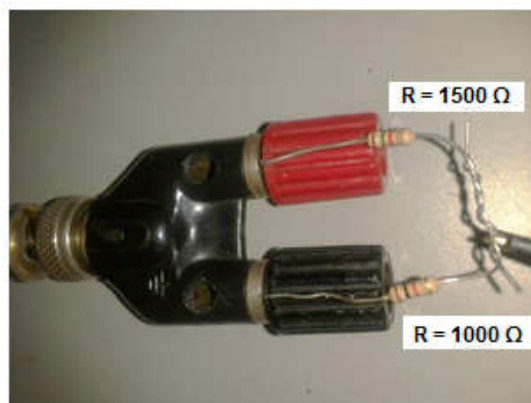


FIGURA 33 – DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO NO EXPERIMENTO
FONTE: O autor (2011)

3.2.3 CALIBRAÇÃO DA RESPOSTA DO SENSOR DE CORRENTE MARCA BERGOZ

O sinal de tensão na saída da bobina que mostra o comportamento dos sensores de corrente é obtido mediante uma análise do pulso de entrada, pois além de obter as características do pulso no condutor, tem-se a resposta do pulso de tensão de saída na bobina. Na FIGURA 34 tem-se o diagrama esquemático para calibração da resposta do sensor de corrente marca *Bergoz*.

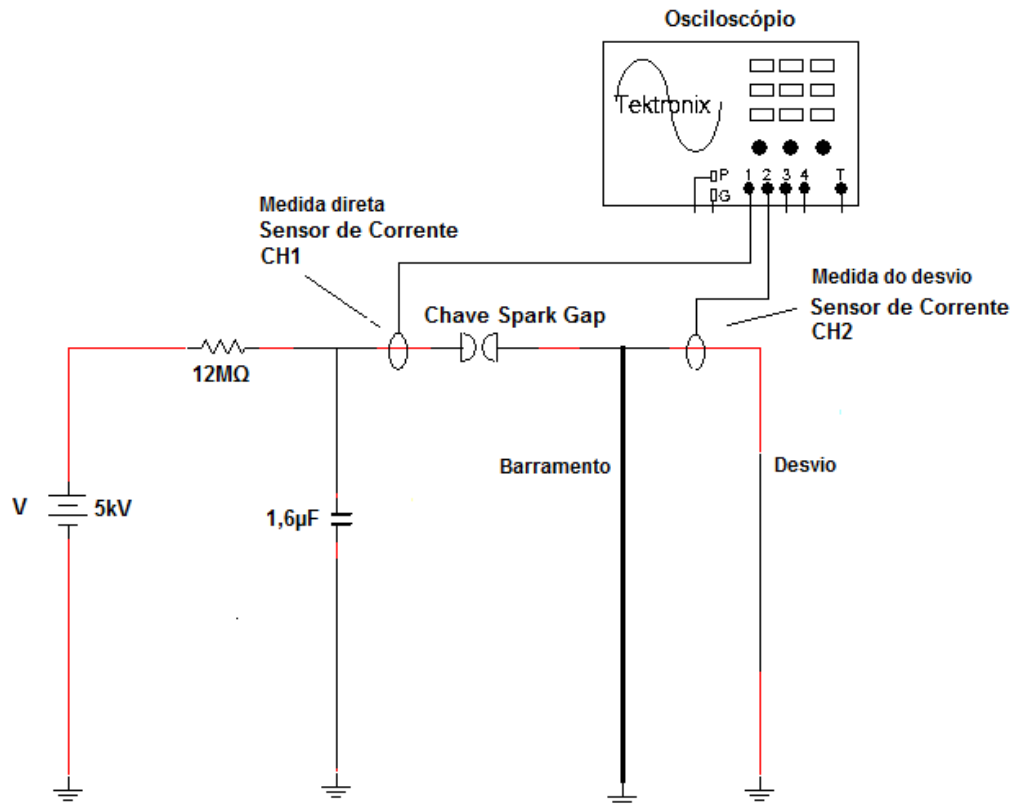


FIGURA 34 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE MARCA BERGOZ
 FONTE: O autor (2012)

No circuito do diagrama esquemático tem-se uma fonte de alta tensão DC, uma resistência de 12 MΩ cuja função é auxiliar a carga do capacitor. Quando a tensão elétrica no capacitor atinge o valor de disparo da chave *spark gap*, um pulso de corrente elétrica se desenvolve no circuito RLC formado pelo capacitor. Este pulso é utilizado para comparar os sinais elétricos gerados pelos sensores de corrente elétrica por meio do registro em um osciloscópio digital. Um sensor foi colocado no canal CH1 para medição direta e outro sensor no canal CH2 para medição do desvio, pois o sensor de corrente utilizado possui limitações na corrente elétrica direta gerada na descarga. Na FIGURA 35 tem-se o arranjo experimental para calibração da resposta do sensor de corrente marca *Bergoz*.

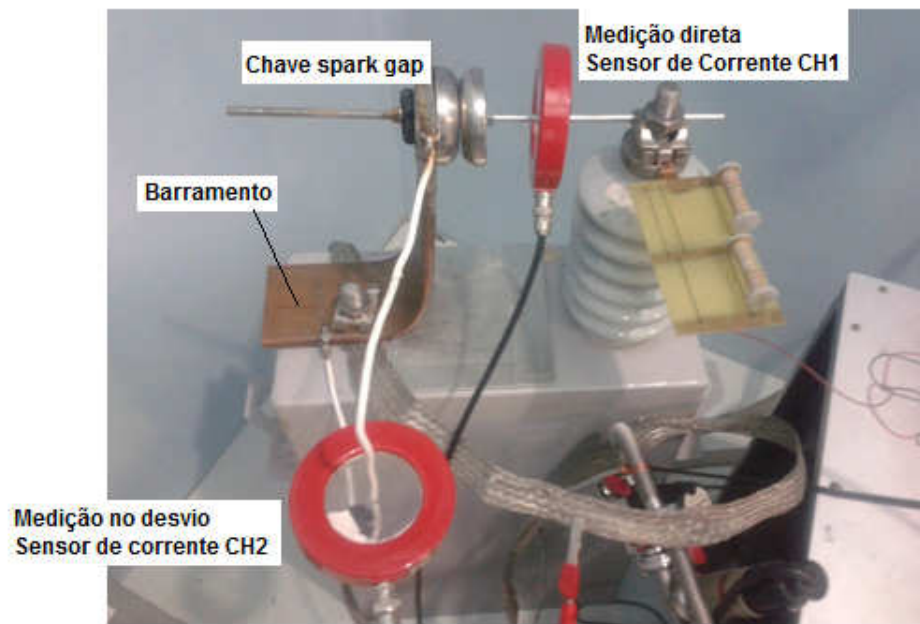


FIGURA 35 – ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE MARCA BERGOZ
 FONTE: O autor (2012)

Para o cálculo do fator de calibração selecionam-se as amplitudes máximas da tensão elétrica (média dos pontos máximos) nos sinais elétricos gerados para a medida direta – CH1 e para a medida do desvio – CH2. Os valores selecionados são usados para o cálculo da corrente elétrica direta e da corrente elétrica do desvio, conforme equação (3) para o canal CH1 (medição direta) e equação (4) para o canal CH2 (medição do desvio). Com a corrente elétrica direta e de desvio calculada, fez-se a média aritmética dos valores para encontrar o fator de calibração conforme equação (5).

- I_{DIRETA} - (corrente elétrica direta que passa pelo sensor – CH1)

$$I_{DIRETA} = V_{DIRETA} \times \frac{2 \times 2,5}{0,05 \frac{V}{A}} \quad (3)$$

- I_{DESVIO} - (corrente elétrica do desvio que passa pelo sensor- CH2)

$$I_{DESVIO} = V_{DESVIO} \times \frac{2}{0,05 \frac{V}{A}} \quad (4)$$

- K_{FATOR} – (Fator de calibração do sensor de corrente elétrica)

$$K_{FATOR} = \frac{I_{DIRETA}}{I_{DESVIO}} \quad (5)$$

onde V_{DIRETA} e V_{DESVIO} são as amplitudes de tensão elétrica selecionadas nos gráficos gerados, (x 2) refere-se ao casador de impedância (como se opera com frequências e potências elevadas, pode-se ter o efeito de reflexão do sinal elétrico na carga prejudicando o funcionamento do sistema ou causando danos no gerador de sinal), (x 2,5) ao divisor de tensão resistivo, (0,05 V/A) é o fator de calibração do sensor de corrente.

3.2.4 CALIBRAÇÃO DA RESPOSTA DOS SENSORES DE CORRENTE MARCA BERGOZE TIPO BOBINA DE ROGOWSKI

Na FIGURA 36 tem-se o diagrama esquemático e na FIGURA 37 o arranjo experimental para geração dos sinais do sensor de corrente marca *Bergoz* colocado no CH1 e do sensor tipo bobina de Rogowski colocado no CH2, pois os sensores utilizados têm suas limitações de corrente e tensão no circuito característico do sistema “*plasma focus*”. No circuito há uma fonte de alta tensão DC, uma resistência de 12MΩ cuja função é auxiliar a carga do capacitor. Quando a tensão no capacitor atinge o valor de disparo da chave *spark gap* um pulso de corrente se desenvolve no circuito RLC formado pelo capacitor. Este pulso é utilizado para comparar os sinais gerados pelos sensores de corrente marca *Bergoz* e tipo bobina de Rogowski por meio do registro em um osciloscópio digital.

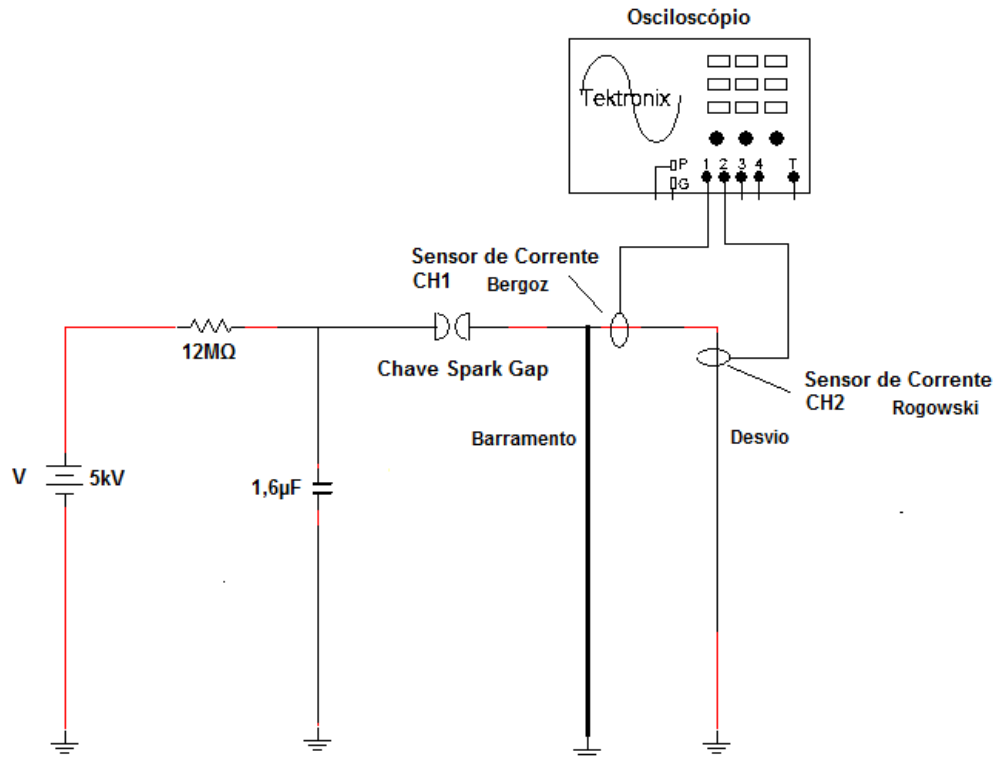


FIGURA 36 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS DOS SENSORES DE CORRENTE *BERGOZ* E TIPO BOBINA DE ROGOWSKI.
FONTE: O autor (2012)

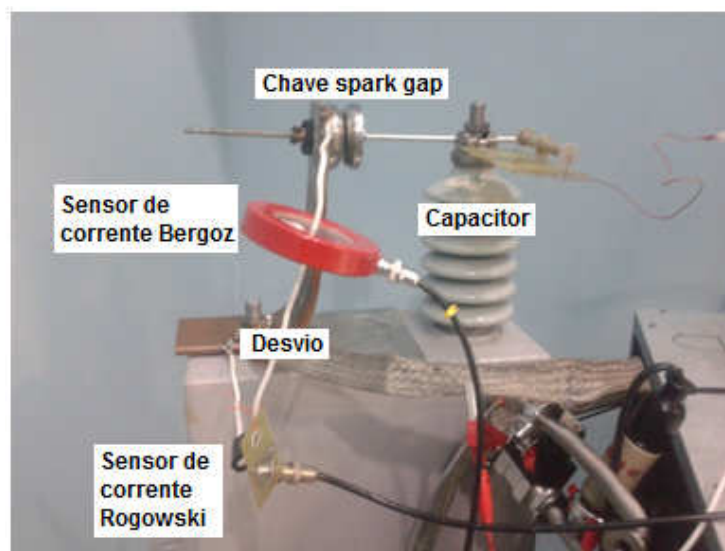


FIGURA 37 – ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS DOS SENSORES DE CORRENTE *BERGOZ* E TIPO BOBINA DE ROGOWSKI.
FONTE: O autor (2012)

Para o cálculo do fator de calibração dos sensores de corrente foram monitorados e observados os sinais gerados no osciloscópio e, após os dados coletados destes sinais foram transferidos através de uma *interface GPIB* conectada

ao osciloscópio para um computador com o *software Open Choice Desktop* da *Tektronix* para aquisição dos dados dos sinais. Estes dados foram transferidos para o *software Origin®* para gerar as formas de ondas da corrente e da tensão a serem analisadas. Após, foi gerada a forma de onda da derivada da corrente para comparação com a forma de onda da tensão, pois a relação da amplitude do pulso de tensão (A_1) medida pelo sensor de corrente tipo bobina de Rogowski com a amplitude do pulso da derivada da corrente (A_2) fornece o fator de calibração da bobina dentro de suas limitações de funcionamento, conforme pode ser visto na equação (6),

$$K = \frac{A_1}{A_2} \quad (6)$$

3.2.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SISTEMA “PLASMA FOCUS”

O arranjo experimental mostrado na FIGURA 38 e sequência de operação que se segue tem como propósito auxiliar a determinação dos parâmetros elétricos do sistema “*plasma focus*”.

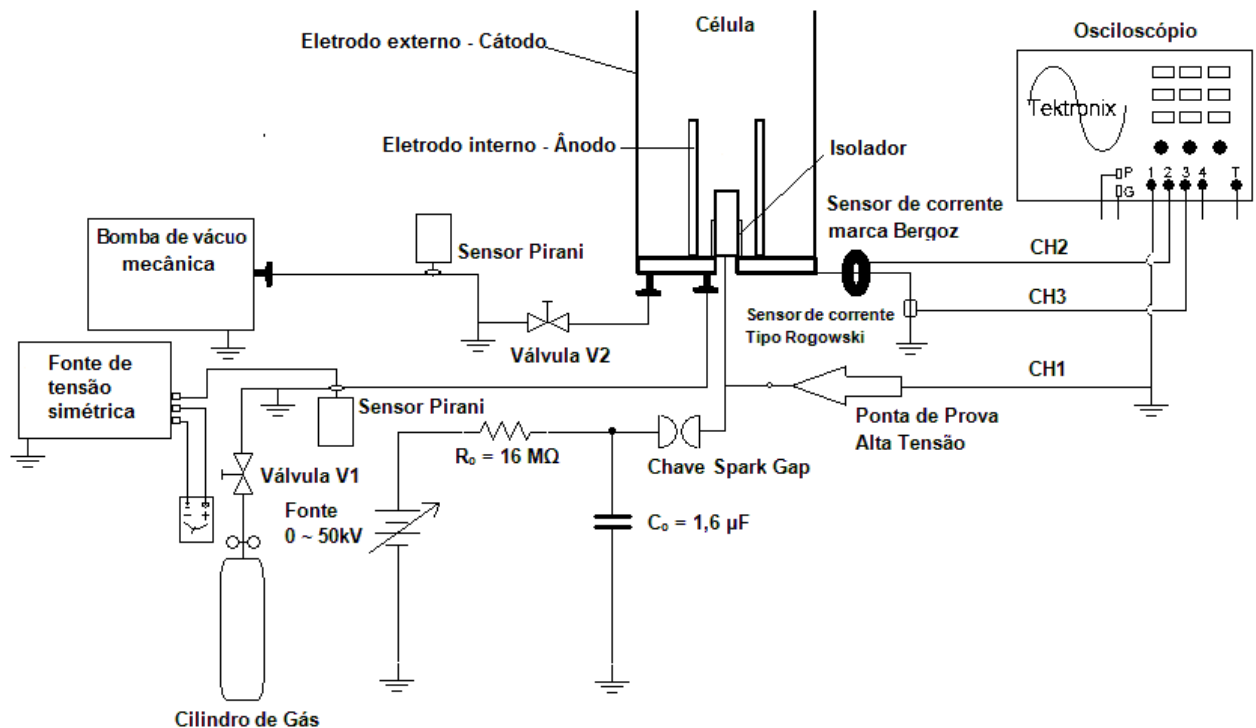


FIGURA 38 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL DO SISTEMA “PLASMA FOCUS”

FONTE: O autor (2012)

A sequência de operação do arranjo experimental da FIGURA 38 é descrita a seguir:

- Abre-se a válvula V2 e fechada a válvula V1.
- Liga-se a bomba de vácuo para limpeza da célula. Aguarda-se a pressão atingir $2,2 \cdot 10^{-2}$ mbar, conforme valor de referência da bomba.
- Liga-se os equipamentos como fonte de alta tensão, osciloscópio (Canal 1 – CH1 na ponta de prova de alta tensão, Canal 2 - CH2 no sensor de corrente marca *Bergoz* e Canal 3 - CH3 no sensor de corrente tipo Rogowski), multímetro, fonte simétrica de alimentação do sensor de vácuo Pirani.
- Abre-se a válvula V2 para injeção do gás de trabalho no interior da célula. O ajuste da pressão foi controlado nas válvulas V1, V2 e na válvula reguladora de pressão no cilindro para uma pressão, no interior da célula, de 1 mbar.
- Ajusta-se a distância na chave *spark gap*.
- Aumenta-se a tensão gradualmente até o disparo da chave *spark gap*.
- Através do gerador de sinais monitoram-se os sinais de corrente e de tensão no osciloscópio de acordo com os sensores de corrente marca *Bergoz*, tipo bobina de Rogowski e ponta de prova de alta tensão.
- Observa-se, analisa-se e gravam-se os sinais de corrente e tensão dos sensores no osciloscópio, conforme os canais selecionados.
- Desliga-se todo o arranjo experimental do sistema “*plasma focus*”.
- Transferem-se os dados através de uma *interface GPIB*, conectada no osciloscópio e, no computador, para o *software Open Choice Desktop* da *Tektronix* para aquisição dos dados dos sinais gerados.

- Analisa-se no *software Origin®* as formas de onda da tensão e a corrente do circuito característico do sistema “*plasma focus*”.
- Calculam-se os parâmetros elétricos do sistema “*plasma focus*”.

3.2.6 DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA DO CIRCUITO

Para a descarga no sistema “*plasma focus*” foi considerado o circuito elétrico equivalente ao representado na FIGURA 39, pois inicialmente a energia é armazenada no capacitor e, após, é descarregada no sistema [24].

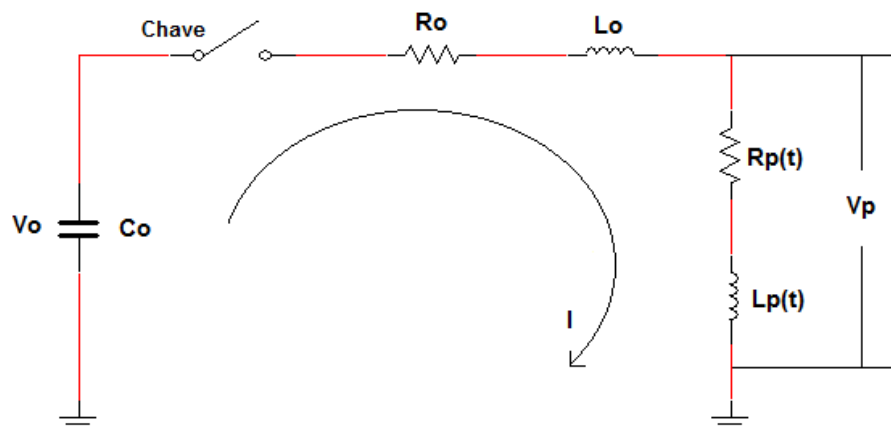


FIGURA 39 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO SISTEMA “*PLASMA FOCUS*”, RESISTÊNCIA (R_p) e INDUTÂNCIA (L_p) DO PLASMA VARIANDO COM O TEMPO. TENSÃO DO PLASMA (V_p) MEDIDA ENTRE O ÂNODO E CÂTODO [24]

A equação de descarga do sistema é:

$$V_c(t) = V_o - \frac{1}{C_o} \int I dt = IR_o + L_o \frac{dI}{dt} + IR_p + \frac{d}{dt}(L_p I) \quad (7)$$

onde V_c é a tensão do capacitor, V_o é a tensão de carga, C_o é a capacitância, R_o é a resistência do sistema, $R_p(t)$ é a resistência do plasma e L_p é a indutância do plasma [24].

Para a descarga no sistema o sinal é dado por [24]

$$I(t) = I_o e^{-\alpha t} \text{sen}(\omega_d t) \quad (8)$$

$$V(t) = V_o e^{-\alpha t} \text{cos}(\omega_d t) \quad (9)$$

onde α é o coeficiente de amortecimento e ω_d é a frequência amortecida do sistema.

Na FIGURA 40 é mostrado o gráfico que ilustra a resposta natural do circuito RLC para o caso subamortecido. A resposta criticamente amortecida sobe e desce mais rapidamente do que a resposta sobreamortecida. A resposta subamortecida é uma senóide exponencialmente amortecida cuja taxa de queda é dependente do fator α . Os termos $\pm e^{-\alpha t}$ definem o que é chamado de resposta temporal, e as oscilações subamortecido estão confinadas nesta resposta [55, 56].

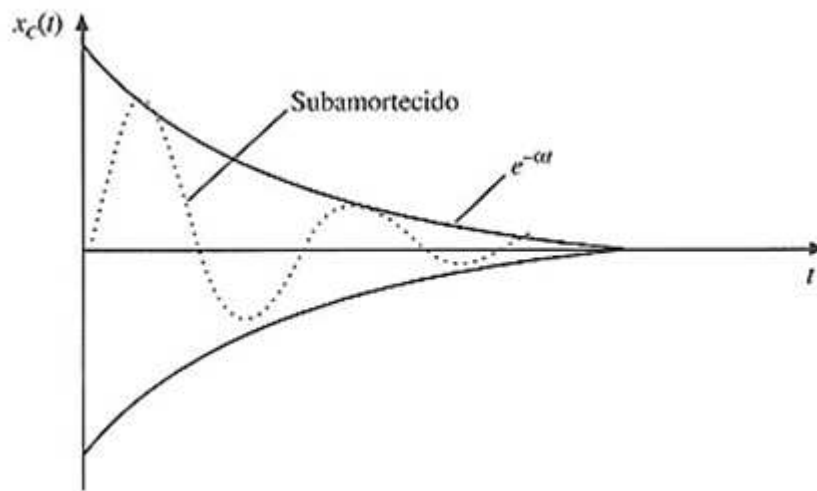


FIGURA 40 – RESPOSTA NATURAL DO CIRCUITO RLC [55].

Considerando que o circuito tem resposta subamortecido, conforme é visto na FIGURA 41, utiliza-se o sinal de corrente registrado no osciloscópio.

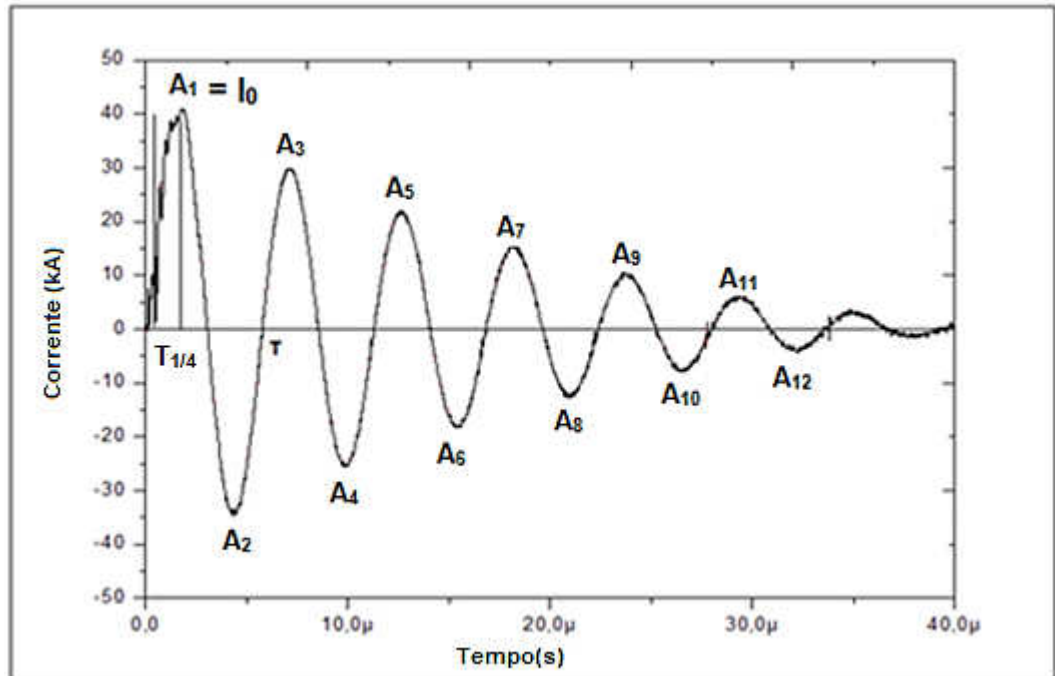


FIGURA 41 – RESPOSTA SUBAMORTECIDO DO CIRCUITO RLC [57]

Para determinar o coeficiente de amortecimento α são registradas as amplitudes máximas de cada oscilação no gráfico da FIGURA 41. As amplitudes são colocadas num gráfico contra os respectivos tempos onde é gerada uma curva exponencial decrescente. A partir desta curva exponencial decrescente é determinado o coeficiente de amortecimento α .

O período de oscilação completa T também é encontrado no gráfico da corrente da FIGURA 41 e um quarto do período é calculado pegando o valor do período e dividindo por 4.

A frequência de oscilação f é o inverso do período de oscilação completa T [55],

$$f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

A frequência de amortecimento ω_d depende da frequência f da equação (10) [55],

$$\omega_d = 2.\pi.f \quad (11)$$

A frequência natural de oscilação ω_n é calculada levando-se em consideração a frequência de amortecimento ω_d da equação (11) e o coeficiente de amortecimento α observado no gráfico da FIGURA 41 [55],

$$\omega_n = \sqrt{\omega_d^2 - \alpha^2} \quad (12)$$

A indutância total do circuito L depende da capacitância C_o , coeficiente de amortecimento α e frequência angular natural ω_n [55],

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 C_o} \quad (13)$$

A energia armazenada E_o no circuito é calculada de acordo com a capacitância C_o e a tensão de carga V_o do capacitor [55],

$$E_o = \frac{1}{2} C_o (V_o)^2 \quad (14)$$

A corrente máxima I_o do circuito pode ser visualizada no gráfico da forma do sinal da corrente (pico máximo) FIGURA 41 [55],

A impedância Z_o do circuito é calculada de acordo com o valor já calculado da indutância L e da capacitância C_o do capacitor [55],

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C_o}} \quad (15)$$

A resistência total do circuito R é calculada de acordo com o valor do coeficiente de amortecimento α e da indutância L [55],

$$R = 2\alpha L \quad (16)$$

3.2.7 SIMULAÇÃO DA INDUTÂNCIA DO CIRCUITO

Com os dados já coletados e calculados na parte experimental do sistema, foi simulado através do *software Multisim Power Pro edition 11.0*, o comportamento do circuito. Para tanto, foram usados os valores experimentais da tensão de carga (V_o), da capacitância (C_o) e do valor da resistência do circuito (R_o).

Na FIGURA 42 é mostrado o circuito elétrico montado no *software Multisim*.

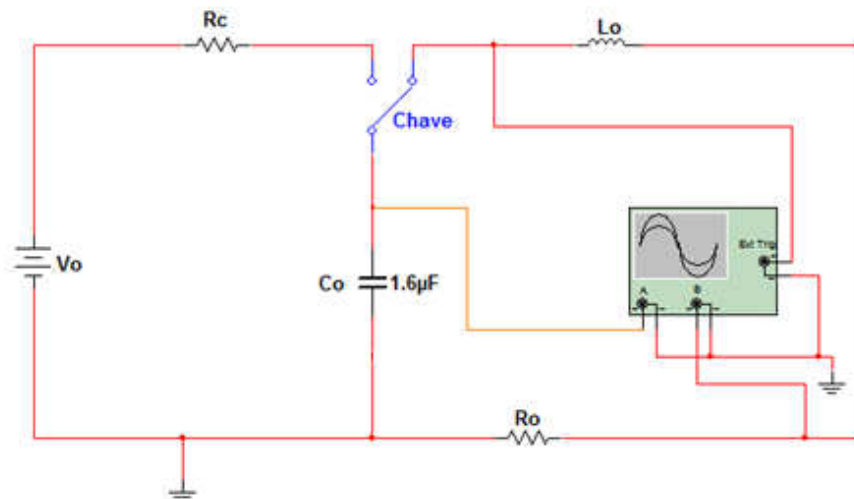


FIGURA 42 – CIRCUITO SIMULADO NO SOFTWARE MULTISIM
FONTE: O autor (2012)

Como a resposta temporal do circuito RLC é subamortecido, utiliza-se o sinal de corrente registrado no osciloscópio.

Na determinação do coeficiente de amortecimento α registram-se as amplitudes máximas de cada oscilação. Estas amplitudes são colocadas em um

gráfico contra os respectivos tempos onde é gerada uma curva exponencial decrescente. A partir desta curva exponencial decrescente é determinado o coeficiente de amortecimento α .

O período de oscilação completa T também é encontrado no gráfico da corrente e um quarto do período é calculado pegando o valor do período e dividindo por 4.

A frequência de oscilação f é calculada conforme a equação (10).

A frequência de amortecimento ω_d é calculada conforme a equação (11),

A frequência natural de oscilação ω_n é calculada conforme a equação (12),

A indutância total do circuito L é calculada conforme a equação (13),

A energia armazenada E_o no circuito é calculada conforme a equação (14),

A impedância Z_o do circuito é calculada conforme a equação (15)

A resistência total do circuito R é calculada conforme a equação (16),

3.2.8 DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA INTERNA DO CAPACITOR

Com o objetivo de determinar a indutância interna do capacitor foi desconectada a célula do capacitor e conectado o gerador de função. O sinal da frequência do capacitor foi monitorado e observado no osciloscópio de acordo com o diagrama esquemático do arranjo experimental mostrado na FIGURA 43 e do circuito elétrico mostrado na FIGURA 44, onde o resistor e o capacitor estão em série.

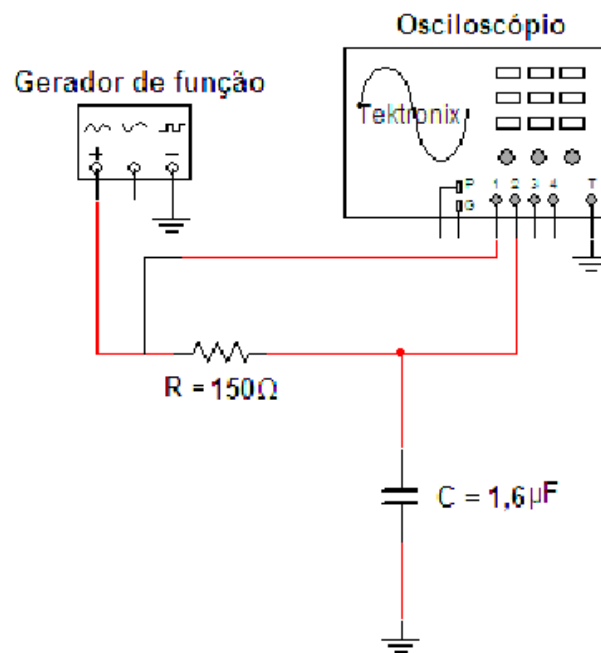


FIGURA 43 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA VERIFICAR A INDUTÂNCIA INTERNA DO CAPACITOR
FONTE: O autor (2012)

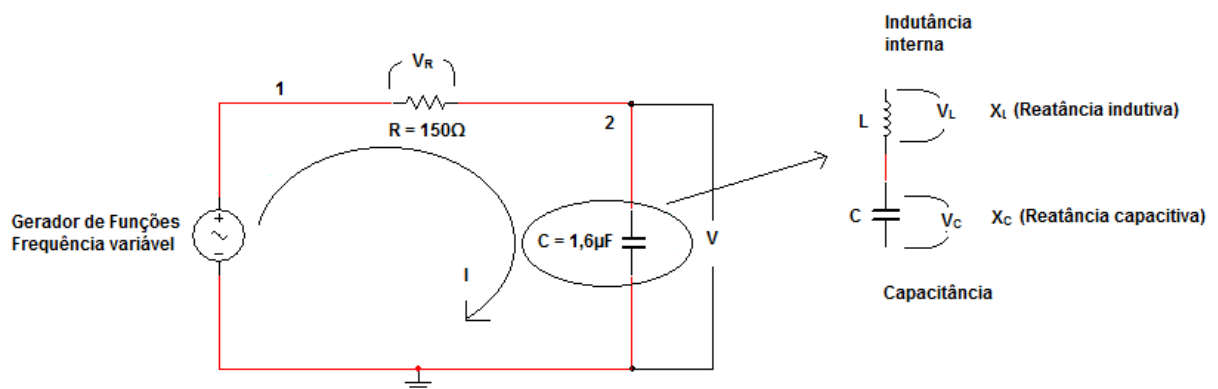


FIGURA 44 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA VERIFICAR A INDUTÂNCIA INTERNA DO CAPACITOR
FONTE: O autor (2012)

O gerador de função foi utilizado para aplicar uma tensão senoidal sobre o circuito RLC em série e um osciloscópio para monitorar os sinais elétricos nos pontos 1 e 2. No canal CH1 foi monitorada a tensão de entrada para referência (fonte) e no canal CH2 a tensão sobre o capacitor, conforme visto na FIGURA 44. Variando gradativamente a frequência no gerador de funções verificou-se que o sinal do canal CH2 começou a perder amplitude devido ao aumento da frequência do sinal aplicado ao canal CH1. Inicialmente a observação do sinal gerado no osciloscópio mostra que a reatância indutiva X_L tende a ser mínima, próxima a zero,

e a reatância capacitiva X_C tende a ser máxima na frequência de ressonância. Como se dispõem de apenas do sinal elétrico do capacitor para análise, a frequência de ressonância ω é atingida se a reatância capacitiva e a reatância indutiva forem iguais ($X_C = X_L$) e a impedância for puramente resistiva e, portanto, o sinal tender a aproximadamente zero. Como toda a corrente vai passar pela resistência R, o conjunto indutância e a capacitância se comporta como um circuito aberto.

Se

$$X_L = \omega L_{capacitor} \quad (17)$$

e

$$X_C = \frac{1}{\omega C_0} \quad (18)$$

Para o cálculo da indutância, temos $X_L = X_C$, onde

$$\omega L_{capacitor} = \frac{1}{\omega C_0}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{capacitor} C_0}}$$

como $\omega = 2\pi f$, temos

$$2\pi f = \sqrt{\frac{1}{L_{capacitor} C_0}}$$

$$L_{capacitor} = \frac{1}{\omega^2 C_0} \quad (19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são discutidos com base na dinâmica do sistema.

4.1 CONSTRUÇÃO DA CÉLULA

A célula do sistema foi construída em material acrílico transparente de formato cilíndrico com altura de 250 mm e diâmetro interno de 140 mm. Em uma das bases há quatro tubos plásticos fixos e transpassados que estruturam o cilindro central e se ligam a outra extremidade onde há parafusos para fixação e vedação da estrutura. Além disso, há dois orifícios para conexões, um para a retirada do ar e outro para a injeção do gás inerte de trabalho, conforme mostradas nas FIGURAS 46 e 47.

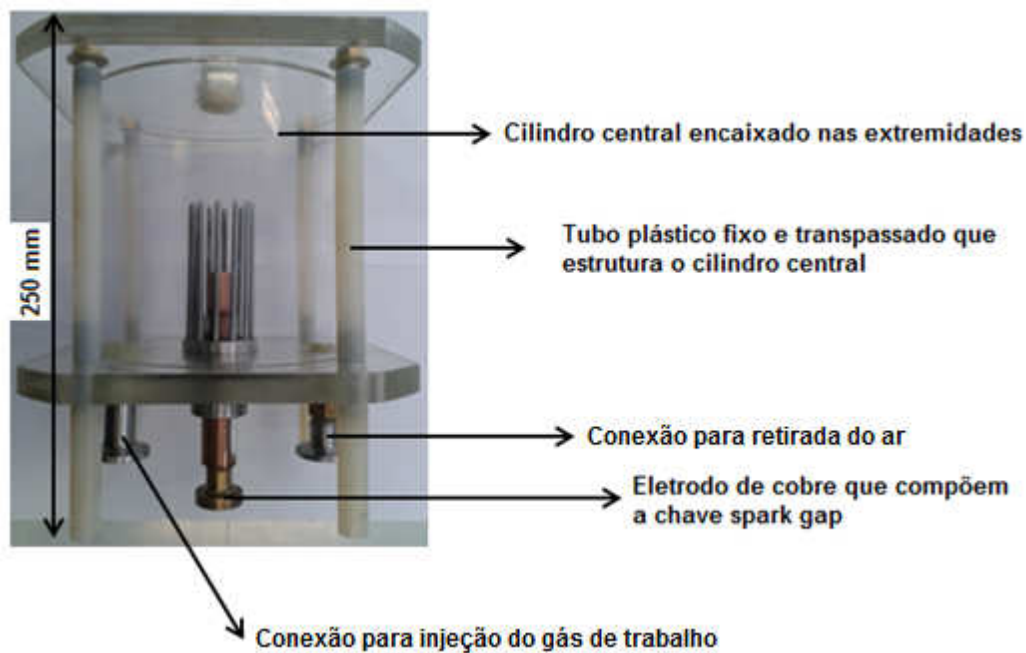


FIGURA 46 – ALTURA E INFORMAÇÕES DA CÉLULA
FONTE: O autor (2012)

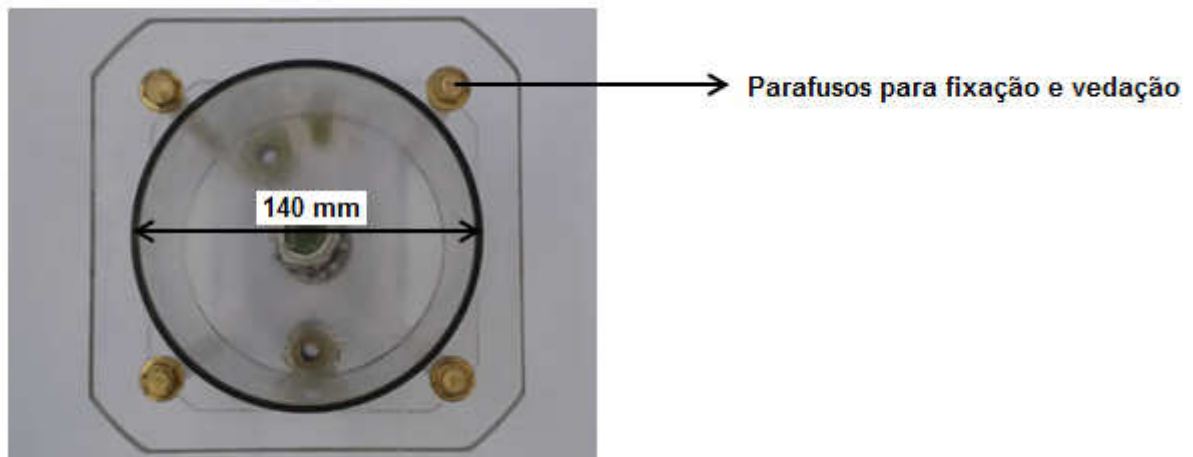


FIGURA 47 – DIÂMETRO INTERNO DA CÉLULA
FONTE: O autor (2012)

No interior da célula tem-se o eletrodo central de cobre (ânodo) que é isolado eletricamente e tem altura de 26 mm e diâmetro de 13 mm. Junto a este eletrodo há o isolador dielétrico de vidro tipo *Pirex*® com altura de 15 mm e diâmetro externo de 19 mm, conforme mostrado na FIGURA 48.

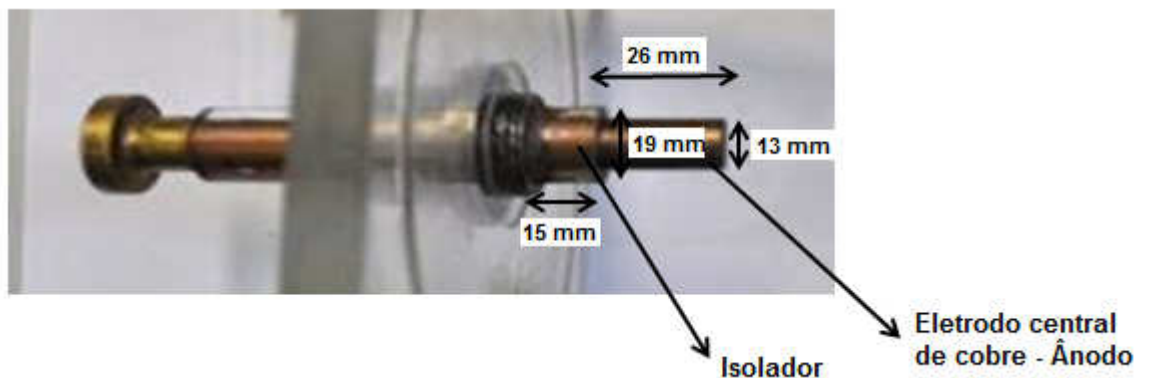


FIGURA 48 – MEDIDAS E INFORMAÇÕES DO ISOLADOR E DO ÂNODO
FONTE: O autor (2012)

No interior da célula tem-se também 12 eletrodos periféricos de aço (cátodo) fixos a uma estrutura em forma de anel que é rosqueada em uma das bases. As dimensões são altura e diâmetro de cada eletrodo 73 mm e 3 mm, diâmetro interno e externo da composição rosqueada 33 mm e 36 mm, conforme mostrado na FIGURA 49.

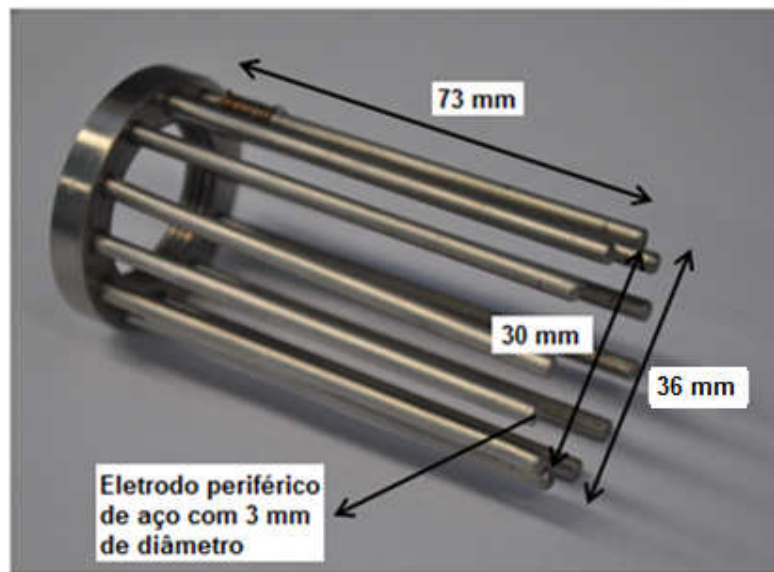


FIGURA 49 – MEDIDAS E INFORMAÇÕES DO CÁTODO
 FONTE: O autor (2012)

4.2 FATOR DE AJUSTE DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE MARCA BERGOZ COM DIVISOR RESISTIVO

De acordo com a tensão de entrada máxima ($V_{entrada}$) de 500 V e da corrente máxima ($I_{máxima}$) de 20 kA, foi calculado utilizando a equação (1) o fator de ajuste de calibração do sensor,

$$f_{ajuste} = \frac{V_{entrada}}{i_{máxima}} = \frac{500 \text{ V}}{20000 \text{ A}} = 0,025 \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

O novo fator de ajuste de calibração do sensor é calculado conforme a equação (2), considerando a inserção do divisor resistivo [57],

$$f_{afinaldr} = \frac{V_{saída}}{i_{máxima}} = \frac{200 \text{ V}}{20000 \text{ A}} = 0,01 \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

4.3 FATOR DE AJUSTE DE CALIBRAÇÃO DA RESPOSTA DO SENSOR PARA DE CORRENTE

As amplitudes máximas da tensão elétrica (média dos pontos máximos) nos sinais elétricos gerados para a medida direta – CH1 e para a medida do desvio – CH2 são observadas nas formas de ondas da tensão elétrica para os sensores de corrente elétrica mostrados na FIGURA 50.

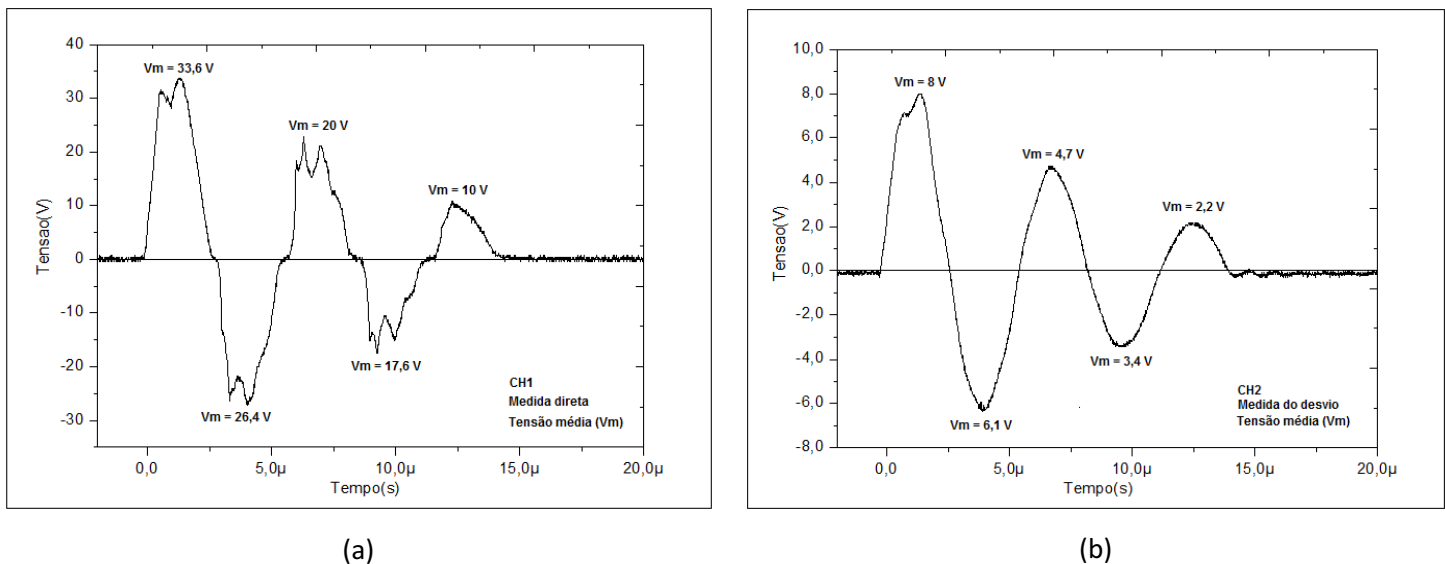


FIGURA 50 – FORMAS DE ONDAS DA TENSÃO DOS SENSORES DE CORRENTE
FONTE: O autor (2012)

Conforme os valores das amplitudes de tensão elétrica selecionados foram calculados a corrente elétrica direta e a corrente elétrica do desvio, conforme equação (7) para o canal CH1 (medição direta) e equação (8) para o canal CH2 (medição do desvio). Com os valores de correntes calculados conforme equação (3) determinou-se o fator de calibração conforme equação (9).

Na TABELA 1 são apresentadas as amplitudes selecionadas, a corrente elétrica direta e de desvio e o fator de calibração.

TABELA 1 – Fator de calibração do sensor de corrente

AMPLITUDES DE TENSÃO (V)		CORRENTE CALCULADA (KA)		FATOR DE CALIBRAÇÃO
V_{DIRETA} - (CH1)	V_{DESVIO} - (CH2)	I_{DIRETA} - (CH1)	I_{DESVIO} - (CH2)	K_{FATOR}
33,6	8	3,36	0,32	10,50
26,4	6,1	2,64	0,24	11,00
20	4,7	2,00	0,19	10,54
17,6	3,4	1,76	0,14	12,57
10	2,2	1,00	0,08	12,50
			Somatório (Σ)	57,11
			Média	11,42

FONTE: O autor (2012)

4.4 FATOR DE AJUSTE DE CALIBRAÇÃO DA RESPOSTA DOS SENSORES DE CORRENTE MARCA BERGOZ E TIPO BOBINA DE ROGOSWIKI

Na FIGURA 51 são mostradas as formas de ondas da corrente, tensão e da derivada da corrente, sendo que os sinais apresentaram variação no estado inicial devido à alteração na tensão ou de algum componente, gerando um comportamento transitório característico de uma corrente contínua e alternada sendo gerada ao mesmo tempo.

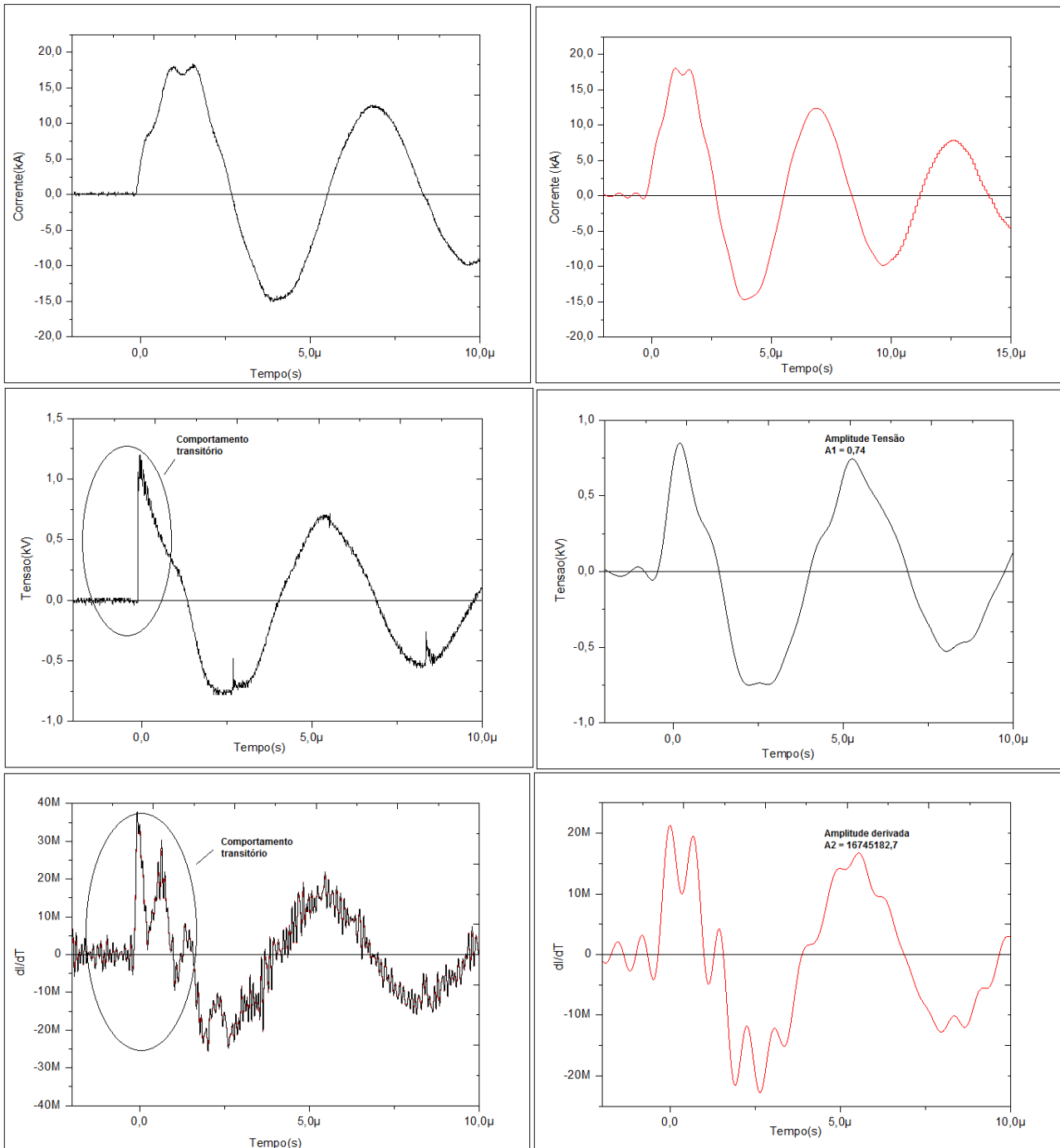


FIGURA 51 – FORMAS DE ONDA DA CORRENTE, TENSÃO E DERIVADA DA CORRENTE PARA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS DOS SENSORES DE CORRENTE MARCA *BERGOZ* E TIPO BOBINA DE ROGOWSKI.

FONTE: O autor (2012)

A relação da amplitude do pulso de tensão medida pelo sensor de corrente tipo Rogowski com a amplitude do pulso da derivada da corrente fornece o fator de calibração da bobina tipo Rogowski, conforme visto na equação (5).

$$K = \frac{A_1}{A_2} = \frac{0,74}{16745182,7} = 0,44 \cdot 10^{-9} \frac{V}{V}$$

4.5 PARÂMETROS ELÉTRICOS DA CÉLULA - EXPERIMENTAL

Os parâmetros observados no gráfico e calculados conforme as equações foram coeficiente de amortecimento α , energia armazenada no circuito E_o , período de oscilação T , um quarto do período de oscilação $\frac{T}{4}$, frequência de oscilação f , frequência de amortecimento ω_d , frequência angular natural ω_n , indutância do circuito L_o , impedância do circuito Z_o , corrente máxima do circuito I_o e, resistência do circuito R_o .

A partir do disparo do capacitor na célula e do comportamento do circuito RLC em série, que no caso se comporta como subamortecido, foram coletados os parâmetros para posterior comparação com outro sistema “*plasma focus*”. A tensão de carga V_o foi de 9,1 kV e a pressão controlada na célula foi de 1,06 mbar produzindo uma onda com o comportamento ressonante mostrado na FIGURA 52.

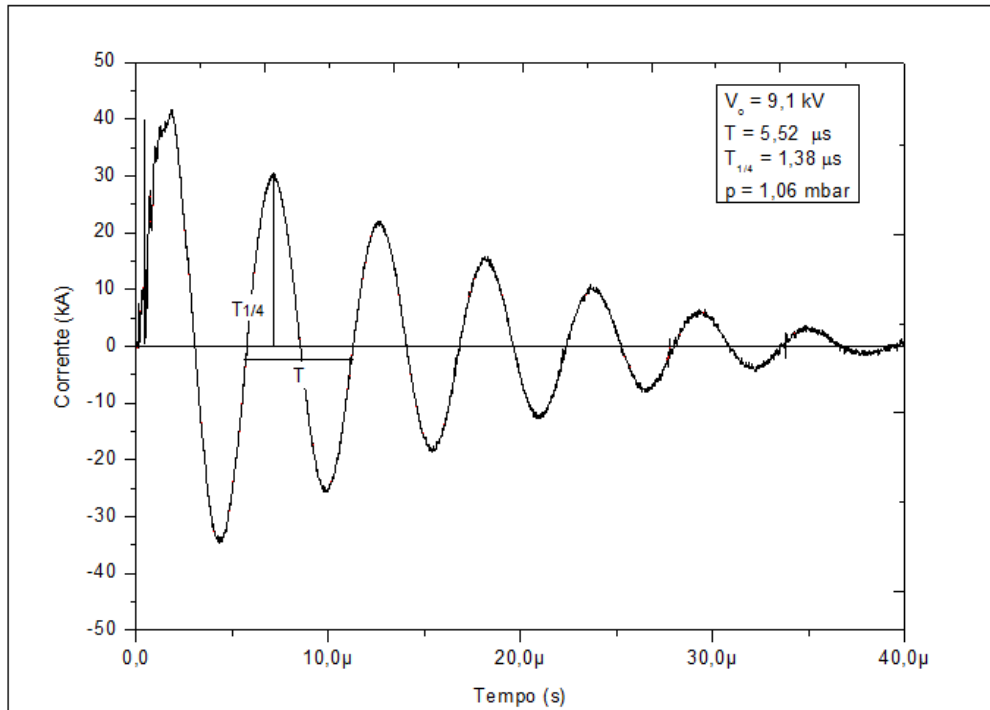


FIGURA 52 – FORMA DE ONDA DO SINAL DA CORRENTE UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA
 FONTE: O autor (2012)

NA FIGURA 53 é mostrada a forma de onda para a tensão medida pelo osciloscópio de acordo com a ponta de prova de tensão.

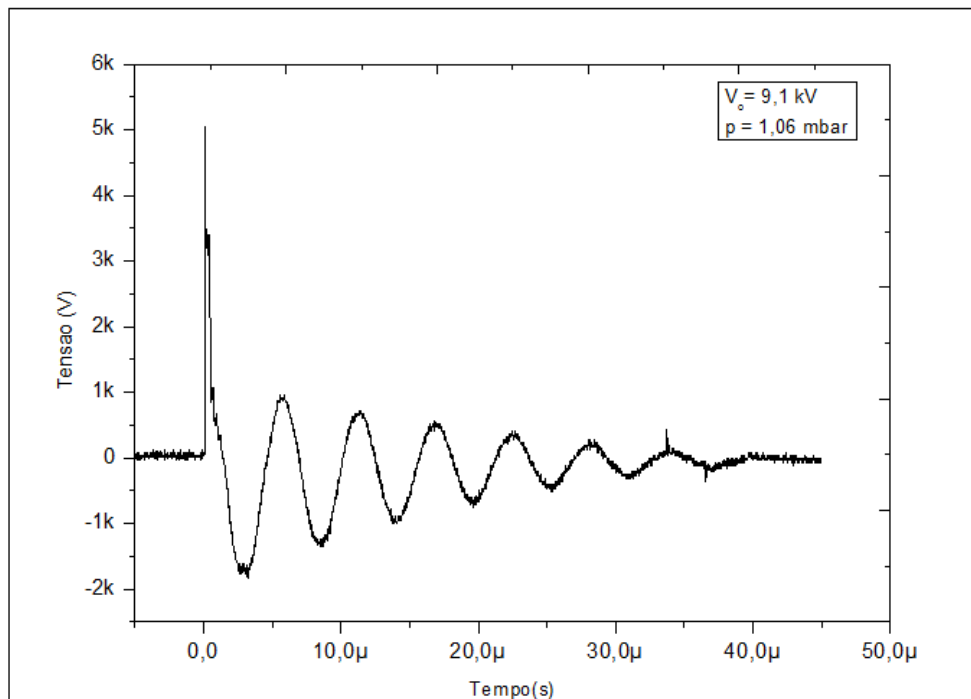


FIGURA 53 – FORMA DE ONDA DO SINAL DA TENSÃO
 FONTE: O autor (2012)

O coeficiente de amortecimento α foi encontrado selecionando as amplitudes atenuadas no gráfico da corrente da FIGURA 53.

Os sinais observados nas formas de onda do sinal da corrente e da tensão do circuito foram transferidos através de uma interface GPIB para o *software Open Choice Desktop* da *Tektronix*. Após a observação dos sinais no *software*, foi realizada a transferência dos dados para o *software Origin®* para tratamento e ajuste não linear exponencial obtendo o parâmetro α que é o coeficiente de amortecimento do circuito RLC, conforme é mostrado na FIGURA 54.

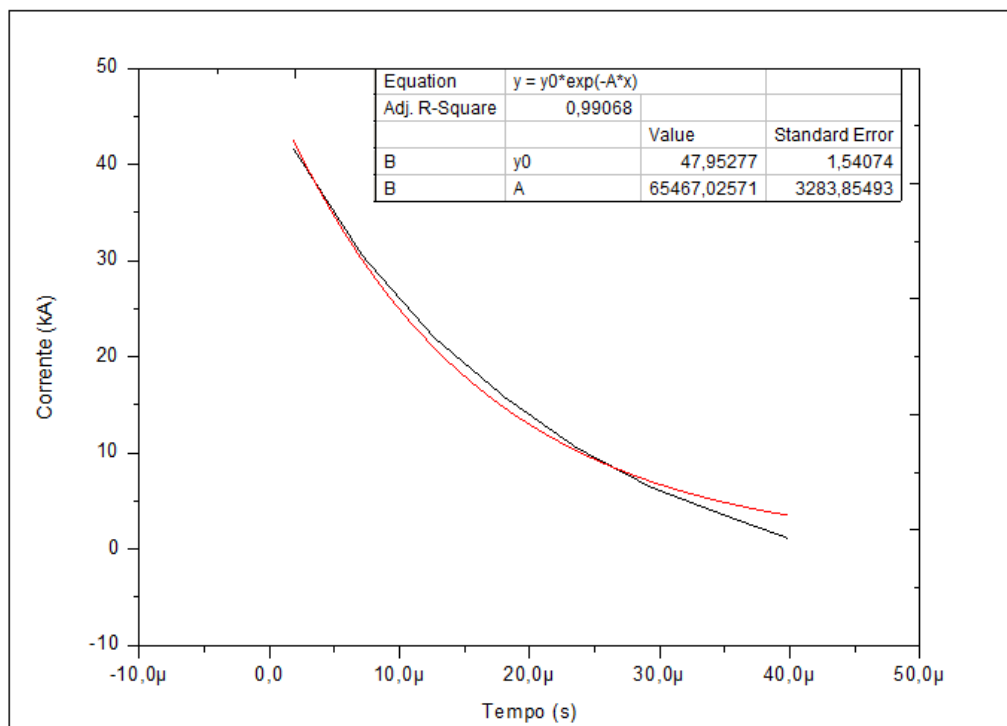


FIGURA 54 – AJUSTE NÃO LINEAR EXPONENCIAL DO SINAL DA CORRENTE – PARÂMETRO α COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO CIRCUITO RLC SÉRIE EXPERIMENTAL
FONTE: O autor (2012)

A equação do ajuste não linear exponencial para determinação do coeficiente de amortecimento α é:

$$y = y_0 e^{-\alpha t} \quad (21)$$

O valor obtido para o coeficiente de amortecimento α é:

$$\alpha = 65467,03 \text{ s}^{-1}$$

A tensão V_o de carga do capacitor é $V_o = 9,1 \text{ kV}$ e a capacitância C_o do capacitor é $C_o = 1,6 \mu\text{F}$.

O sinal da corrente na FIGURA 52 apresentou variação no estado inicial devido à alteração na tensão ou de algum componente, gerando um comportamento transitório característico no sinal da corrente. O período de oscilação completa T foi obtido a partir do primeiro estado estacionário observado no gráfico da corrente da FIGURA 52:

$$T = 5,52 \mu\text{s}$$

O um quarto do período de oscilação $T \frac{1}{4}$ foi calculado dividindo-se o período T da oscilação por 4 (quatro):

$$T_{\frac{1}{4}} = 1,38 \mu\text{s}$$

A frequência f de oscilação foi obtida através da equação (10):

$$f = \frac{1}{T} = 181,16 \text{ kHz}$$

Com o valor da frequência f de oscilação, foi calculada a frequência de amortecimento ω_d conforme a equação (11):

$$\omega_d = 2\pi f = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Da equação (12) foi calculada a frequência angular natural ω_n , conforme valores de frequência de amortecimento ω_d e do coeficiente de amortecimento α :

$$\omega_n = \sqrt{\omega_d^2 - \alpha^2} = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

A indutância L_o do circuito é calculada pela equação (13) desde que seja conhecida a capacitância C_o , coeficiente de amortecimento α e frequência angular natural ω_n :

$$L_o = \frac{1}{\omega_n^2 C_o} = 479,34 \text{ nH}$$

A energia armazenada E_o no circuito foi calculada conforme a equação (14):

$$E_o = \frac{1}{2} C_o (V_o)^2 = 66,25 \text{ J}$$

A corrente máxima I_o do circuito visualizada no gráfico da FIGURA 52:

$$I_o \sim 40 \text{ kA}$$

A impedância Z_o do circuito é calculada de acordo com o valor já calculado da indutância L_o e da capacitância C_o do capacitor conforme a equação (15):

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} = 547,34 \text{ m}\Omega$$

A resistência R_o é calculada de acordo com o valor do coeficiente de amortecimento α e da indutância L_o conforme a equação (16):

$$R_o = 2\alpha L_o = 63,03 \text{ m}\Omega$$

4.6 PARÂMETROS ELÉTRICOS DO CIRCUITO - SIMULAÇÃO

Foram usados, no circuito simulado da FIGURA 42, os valores experimentais da tensão de carga $V_o = 9,1 \text{ kV}$, capacitância $C_o = 1,6 \mu\text{F}$ e do valor da resistência do circuito $R_o = 63,03 \text{ m}\Omega$.

Realizando o ajuste não linear exponencial através do *software Origin®* na forma de onda da corrente gerada no osciloscópio foi obtido o coeficiente de amortecimento α , conforme mostrado na FIGURA 55.

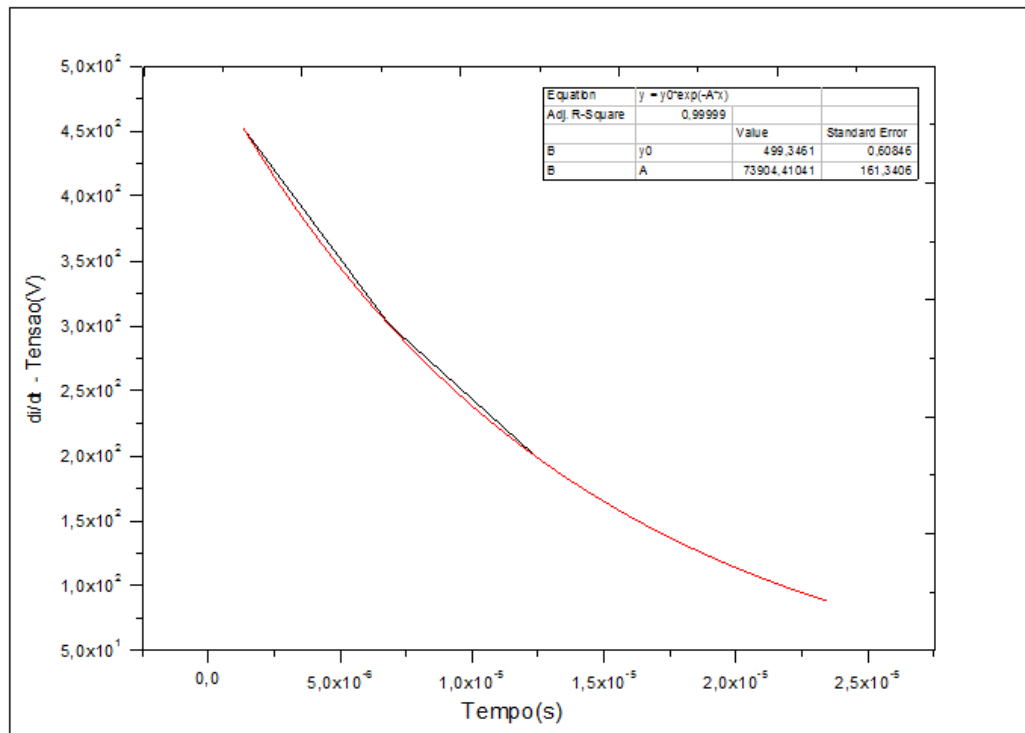


FIGURA 55 – AJUSTE NÃO LINEAR EXPONENCIAL – PARÂMETRO α COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO CIRCUITO RLC SÉRIE SIMULADO
FONTE: O autor (2012)

Os parâmetros observados no gráfico e calculados para efeito de comparação entre o experimental e simulado foram:

Coeficiente de amortecimento exponencial (observado no gráfico da FIGURA 55):

$$\alpha = 73904,41 \text{ s}^{-1}$$

Capacitância do capacitor

$$C_o = 1,6 \mu F$$

Período de uma oscilação completa

$$T = 5,52 \mu s$$

Um quarto do período de uma oscilação completa

$$T_{\frac{1}{4}} = 1,38 \mu s$$

Frequência de uma oscilação completa

$$f = \frac{1}{T} = 181,16 \text{ kHz}$$

Frequência de amortecimento

$$\omega_d = 2\pi f = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Frequência natural de oscilação

$$\omega_n = \sqrt{\omega_d^2 - \alpha^2} = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Indutância do circuito

$$L_o = \frac{1}{C_o \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2}} = 478,91 \text{ nH}$$

Energia armazenada no capacitor

$$E_o = \frac{1}{2} C_o V_o^2 = 66,25 \text{ J}$$

Impedância do circuito

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} = 541,10 \text{ m}\Omega$$

Resistência do circuito

$$R_o = 2\alpha L_o = 70,65 \text{ m}\Omega$$

Na TABELA 2 têm-se os valores comparativos do experimento e da simulação.

TABELA 2 – VALORES EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

GRANDEZA	VALORES EXPERIMENTAIS	VALORES SIMULADOS
Tensão de carga do capacitor	$V_o = 9,1 \text{ kV}$	$V_o = 9,1 \text{ kV}$
Capacitância do capacitor	$C_o = 1,6 \text{ }\mu\text{F}$	$C_o = 1,6 \text{ }\mu\text{F}$
Coeficiente de amortecimento exponencial	$\alpha = 65467,03 \text{ s}^{-1}$	$\alpha = 73904,41 \text{ s}^{-1}$
- A diferença nos valor experimental e simulado do coeficiente de amortecimento exponencial é de aproximadamente 11 %, devido às amplitudes aproximadas que foram selecionadas no gráfico da corrente.		
Período de oscilação completa	$T = 5,52 \text{ }\mu\text{s}$	$T = 5,52 \text{ }\mu\text{s}$
Um quarto do período de oscilação completa	$T_{\frac{1}{4}} = 1,38 \text{ }\mu\text{s}$	$T_{\frac{1}{4}} = 1,38 \text{ }\mu\text{s}$
Frequência de oscilação	$f = 181,16 \text{ kHz}$	$f = 181,16 \text{ kHz}$
Frequência de amortecimento	$\omega_d = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$	$\omega_d = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$
Frequência natural de oscilação	$\omega_n = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$	$\omega_n = 1,14 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$
Indutância do circuito	$L_o = 479,34 \text{ nH}$	$L_o = 478,91 \text{ nH}$
- A diferença do valor experimental e simulado da indutância é de menos de 1%.		
Energia armazenada no capacitor	$E_o = 66,25 \text{ J}$	$E_o = 66,25 \text{ J}$
Impedância no circuito	$Z_o = 547,34 \text{ m}\Omega$	$Z_o = 541,10 \text{ m}\Omega$
- A diferença do valor experimental e simulado da impedância é de menos de 1%.		
Resistência do circuito	$R_o = 63,03 \text{ m}\Omega$	$R_o = 70,65 \text{ m}\Omega$
- A diferença do valor experimental e simulado da resistência é de aproximadamente 10%.		
Todas as diferenças dos valores experimentais e simulados são caracterizadas por problemas na construção da célula, circuito característico, arranjo experimental, erros nas amplitudes selecionadas.		

FONTE: O autor (2012)

4.7 INDUTÂNCIA INTERNA DO CAPACITOR

A frequência de oscilação f observada no sinal do gerador de função foi:

$$f = 208 \text{ kHz}$$

O período da oscilação completa T da oscilação foi calculado através da equação (10):

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{208 \cdot 10^3} = 4,81 \mu s$$

A frequência de amortecimento ω foi calculada conforme a equação (11):

$$\omega = 2\pi f = (2) \cdot (3,1416) \cdot (208 \cdot 10^3) = 1,31 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

A indutância $L_{capacitor}$ do capacitor, conforme os valores da frequência de amortecimento ω da equação (13) e o valor do capacitor de $1,6 \mu F$:

$$L_{capacitor} = \frac{1}{\omega^2 C_o} = \frac{1}{(1,31 \cdot 10^6)^2 (1,6 \cdot 10^{-6})} = 364,20 \text{ nH}$$

4.8 INDUTÂNCIA DA CÉLULA

A indutância da célula foi calculada conforme a equação (20):

$$L_{célula} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) z_o = 4,34 \text{ nH}$$

4.9 INDUTÂNCIA DO SISTEMA (CIRCUITO, CAPACITOR, CÉLULA)

Para a caracterização do comportamento indutivo do sistema, foi levada em consideração a indutância do circuito, capacitor e da célula.

Indutância do circuito:

$$L_o = 479,34 \text{ nH}$$

Indutância do capacitor:

$$L_{capacitor} = 364,20 \text{ nH}$$

Indutância da célula:

$$L_{célula} = 4,34 \text{ nH}$$

Indutância do conjunto (capacitor + célula):

$$L_c + L_{célula} = 364,20 + 4,34 = 368,54 \text{ nH} \quad (21)$$

Subtraindo a indutância do circuito da indutância do conjunto (capacitor + célula), foi obtida a indutância de sobra para o plasma e para o *gap* (espaço entre os eletrodos da chave *spark gap*).

$$[(L_o) - (L_{capacitor} + L_{célula})] = 479,34 - 368,54 = 110,80 \text{ nH} \quad (22)$$

4.10 EFEITO PINCH

Foram realizadas várias tentativas para a observação do efeito *pinch* no experimento. A célula foi desmontada várias vezes para que fosse realizada a limpeza facilitando assim, o sistema de vácuo e o controle da pressão interna. A alteração da distância pré-ajustada na chave *spark gap* controlou a tensão fornecida na fonte, bem como, o armazenamento de energia no capacitor para a descarga elétrica rápida nos eletrodos da célula. A tensão no sensor de vácuo foi de 5,6 a 8,0 V e a pressão interna na célula de 0,413 a 4,0 mbar. A tensão na fonte para a carga do capacitor ficou entre 9,0 e 20 kV, bem como, a corrente elétrica na fonte na carga do capacitor de 0,36 a 0,40 mA. A corrente elétrica de disparo entre 0,09 a 0,16 mA

e a corrente elétrica máxima na fonte no disparo de 0,56 a 0,64 mA. Na FIGURA 56 tem-se a observação do sinal para a tensão no sensor de vácuo de 6,4 V, pressão 1,06 mbar, tensão fornecida na fonte de 20 kV, corrente elétrica na fonte para carregamento do capacitor de 0,40 mA, corrente elétrica de disparo 0,16 mA e corrente elétrica máxima na fonte no disparo 0,64 mA. Mesmo com todas as variações de tensão, corrente, pressão interna, pré-ajuste na chave *spark gap*, não houve a caracterização do efeito *pinch* na célula construída.

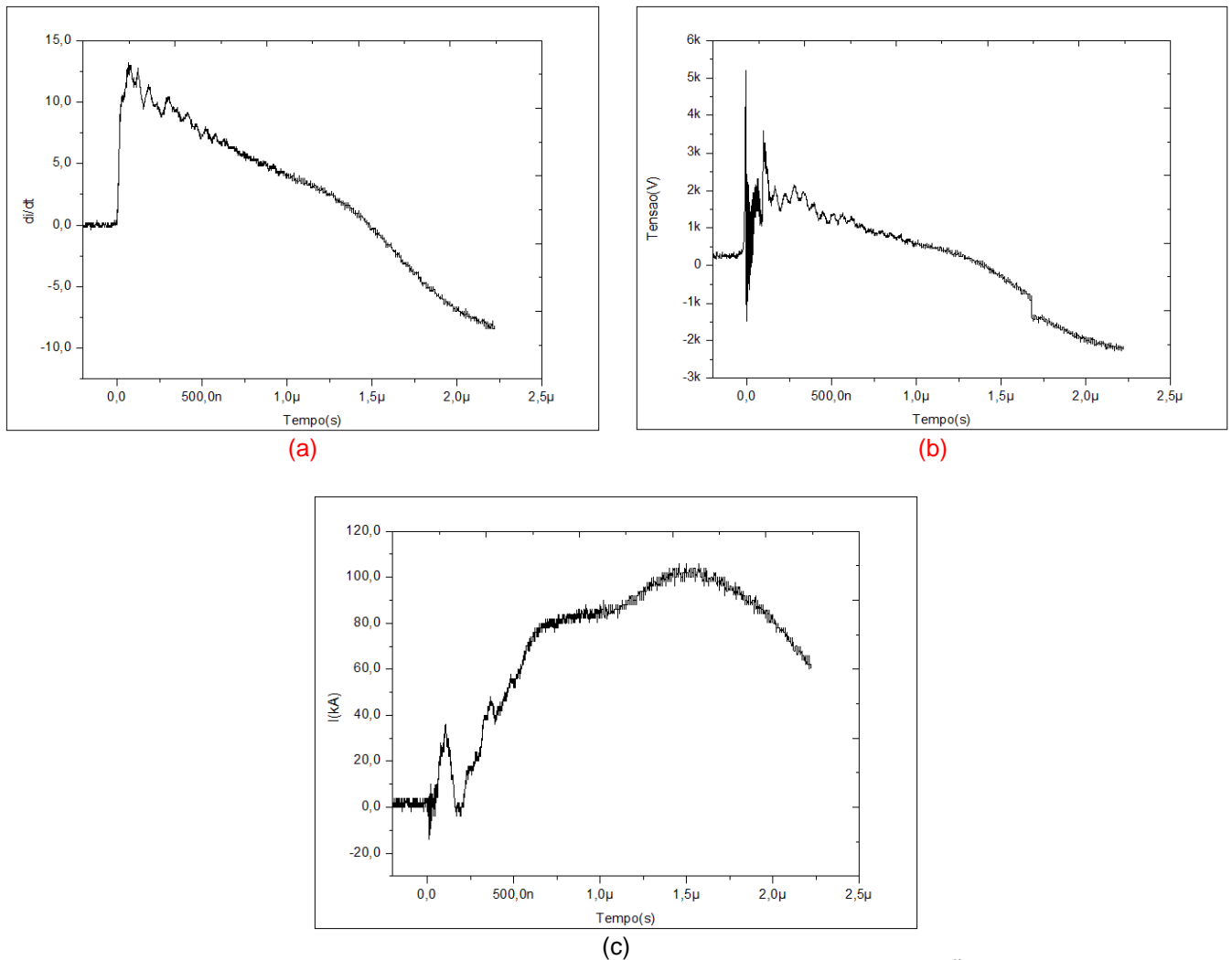


FIGURA 56 – (a) SINAL DA DERIVADA DA CORRENTE, (b) SINAL DA TENSÃO e (c) SINAL DA CORRENTE
 FONTE: O autor (2012)

Na FIGURA 56 é mostrada fotos do experimento.

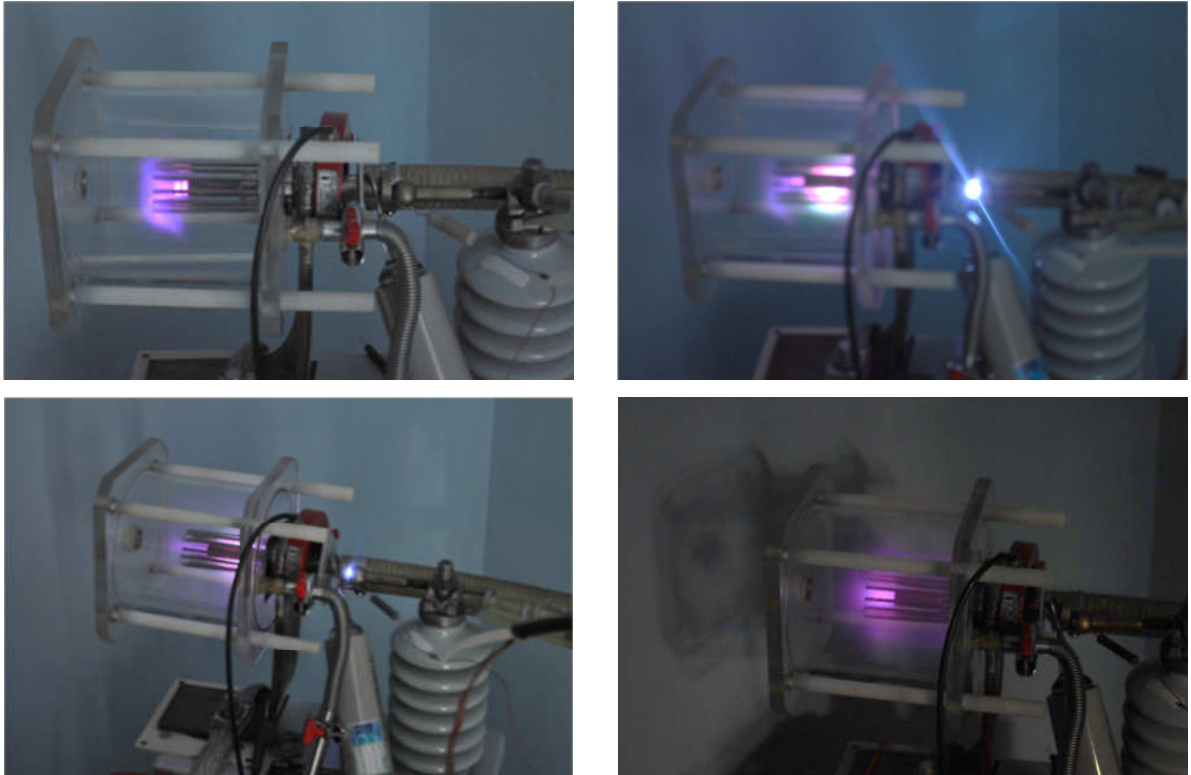


FIGURA 57 – FOTOS DO EXPERIMENTO
FONTE: O autor (2012)

5 CONCLUSÃO

A célula de acrílico foi construída e operou de forma satisfatória quando integrada ao restante do sistema. O controle de pressão no interior da célula em conjunto com o sistema de injeção de gás também operou de forma satisfatória.

Os parâmetros elétricos da célula foram determinados e os valores de indutância indicam que a indutância interna do capacitor é superior à soma das demais indutâncias dos componentes do sistema. Isto impede a máxima transferência de energia do capacitor para a célula dificultando a ocorrência do efeito *pinch*. Capacitores construídos de forma especial com baixa indutância interna devem ser utilizados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Construir outra célula para o sistema “*plasma focus*” alterando as dimensões e os parâmetros elétricos do circuito equivalente.

Calcular a indutância total do sistema “*plasma focus*” levando em consideração a indutância do circuito, indutância do capacitor, indutância do *gap* e indutância do plasma.

Estudar o comportamento de novos gases inertes de trabalho e usá-los em uma nova célula do sistema “*plasma focus*”.

Simular e analisar o funcionamento do sistema “*plasma focus*” em *softwares* 2D e 3D para conhecer novos processos físicos.

Aplicar o sistema a dispositivos de imageamento.

REFERÊNCIAS

- [1] GUGLIOTTI, M. **Irving Langmuir: o milagre da ciência**. Química Nova, v. 24, n. 4, p. 568-572, 2001.
- [2] BRAND, F. **Notes for a 20 lecture course in plasma physics**. School of Physics. University of Sydney NSW, 2006.
- [3] LANGMUIR, I. **Oscillations in ionized gases**. Research Laboratory, General Electric Co., Schenectady, N.Y., v. 14, p. 627-637, 1928.
- [4] BOSS, S. L. B.; FILHO, M. P. S.; CALUZI, J. J. **História da ciência e aprendizagem significativa: o experimento de Coulomb**. Anais do VII EMPEC – Encontro Nacional de Pesquisa e Educação em Ciências, Florianópolis, 2000, ISSN: 21766940.
- [5] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo**. 10. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2004.
- [6] AHMAD, S. **Catalytic action of pre-ionization on radiation emission from a (2-4) kJ Mather-type plasma focus**. 172 f. Tese (Doutorado de Filosofia em Física) – Department of Physics – QUAID-I-AZAM University Islamabad, Pakistan. 2006.
- [7] ROUT, R.K.; AULUCK, S.K.H.; NAGPAL, J.S.; KULKARNI, L.V. **Exploratory studies on a passively triggered vacuum spark**. J. Phys. D: Appl. Phys. v. 32, p. 3013–3018, 1999.
- [8] MATHER, J.W.; WILLIAMS, A.H. **Some properties of graded vacuum spark gap**. The Review of Scientific Instruments, v. 31, n. 3, 1960
- [9] CHITTENDEN, J.P. **The Z-pinch approach to fusion**. Physics world, 2000.
- [10] RAHMAN, H.U.; WESSEL, F.J.; ROSTOKER, N. **Staged Z-pinch**. Physical Review Letters, v. 74, n. 5, 1995.
- [11] GOMES, G. F. **Construção e diagnósticos básicos de um Z-pinch**. 81 f. – Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física de Plasmas, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1994.
- [12] BERNSTEIN, MELVIN J. **Acceleration mechanism for neutron production in plasma focus and z-pinch discharges**. Phys. Fluids, v. 13, n. 11, 1970.
- [13] BING, S. **Comparative study of dynamics and X-ray emission of several plasma focus devices**. 206 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Physics Division – School of Science Nanyang Technological University, 2000.
- [14] LEE, S. **Diagnostics and insights from current waveform and modeling of plasma**

focus. International Workshop on Plasma Diagnostics & Applications, Singapore, 2009

[15] MARTINS, R.A. A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, n. 4, p. 373, 1998.

[16] OLIVEIRA, A.R.; NOGUEIRA, S. **Raios X: do descobrimento a sua aplicação no radiodiagnóstico.** Trabalho de conclusão do curso de Especialização em Docência na Educação Superior da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), 2003.

[17] **FÍSICA do século XX.** Disponível em: <<http://www.cesarzen.com/fisicaseculoxxb.html>>. Acesso em: 06/07/2011.

[18] CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C.R.C.; SOUZA, D.F.; MUZINATT, J. **Uma aula sobre efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades.** A Física na Escola, v. 3, n. 1, p. 24-29, 2002.

[19] FILGUEIRA, C.A. **Duzentos anos da teoria atômica de Dalton.** Química Nova, n. 20, p. 38-44, 2004.

[20] OLDENBERG, O.; HOLLADAY, W. G. **Introdução à física atômica e nuclear.** 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 197.

[21] MATHER, J. W. **Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus.** Phys. Fluids, v. 8, n. 366, 1965.

[22] WILLINBORG, D.L.; HENDRICKS C.D. **Design and construction of dense plasma focus device.** 97 f. Charged Particle Research Laboratories – Department of Electrical Engineering, University of Illinois, Illinois, 1976.

[23] BING, S. **Comparative study of dynamics and X-ray emission of several plasma focus devices.** 206 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Physics Division – School of Science Nanyang Technological University, 2000.

[24] SALDIVIA, A.E.T. **Estudio experimental de uma descarga Plasma Focus rápida operada em el rango de decenas de Joules emitiendo nêutrones.** 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Físicas). Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Chile, 2011

[25] ZHANG, T.; RAWAT, R.S.; HASSAN, S.M.; LIN, J.J.; MAHMOOD, S.; TAN, T.L.; SPRINGHAM, S.V.; GRIBKOV, V.A.; LEE, P.; LEE, S. **Drive parameter as a design consideration for Mather an Filippov types of plasma focus.** IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 34, NO. 5, 2006.

[26] HABIBI, M.; AMROLLAHI, R.; FARRAHI, M. **Study of dense plasma-surface interaction by a Filippov type plasma focus device.** Brazilian Journal of Physics, vol. 38, no. 2, 2008.

[27] GRIBOV, V.A.; CHERNYSHOVA, M.V.; CICUTTIN, A.; CRESPO, M.L.; MIKLASZEWSKI, R.A.; SCHOLZ, M.; SHAPIRO, A.E.; TOMASZEWSKI, K; TUNIZ,

C. **Dense Plasma focus “Bora” operational.** *The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics* and experiments provided with the device. 2008.

[28] RIBEIRO, J. E. A. **“Sobre a Força de Lorentz, os conceitos de campo e a essência do eletromagnetismo clássico”.** 114 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, 2008.

[29] DIONÍSIO, P. H. **A força eletromotriz de movimento e os fundamentos da teoria eletromagnética clássica.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 4, 2010.

[30] BRZOSKO, J.S. **High efficiency plasma focus: fusion and applications.** *Anais do 7th Symposium Current Trend in International Fusion Research.* U.S. Department of Homeland Security CBP-LSS-TC, Reston, VA 20191, 2007

[31] KHAN, L.A. **Surface modification of materials using dense plasma focus device.** 182 f. Tese (Doutorado em Filosofia). Department of physics – GC University Lahore, 2004.

[32] MILANESE, M.M.; MOROSO, R.L. **The first stages of the discharge in a low-energy dense plasma focus.** *IEEE Transactions on plasma science*, v. 33, n.5, 2005.

[33] SOTO, L. ***New trends and future perspectives on plasma focus research.*** *Plasma Phys. Control. Fusion* 47 (2005) A361-A381.

[34] MATHER, J.W. **Formation of high density deuterium plasma focus.** *Phys. Fluids*, v.8, n.2, 1965

[35] MATHER, J.W.; BOTTOMS, P.J. **Characteristics of the dense plasma focus discharge.** *Phys. Fluids*, v. 11, n.8, 1968

[36] GARY, S. P. **Ion acceleration in a plasma focus.** *Phys. Fluids*, v. 17, n.17, 1974.

[37] FILIPPOV, N.V.; FILIPPOVA, T.I.; KARAKIN, M.A.; KRAUZ, V.I.; TYKSHAEV, V.P.; VINOGRADOV, V.P.; BAKULIN, Y.P.; TIMOFEEV, V.V.; ZINCHENKO, F.Z.; BRZOSKO, J.R.; BRZOSKO, J.S. **Filippov type plasma focus as intense source of hard x-rays (E= 50 keV).** *IEEE Transactions on plasma science*, v. 24, n.4, 1996

[38] DA RE, A.; MEZZETTI, F.; TARTARI, A.; VERRI, G.; RAPEZZI, L.; GRIBKOV, V.A. **Preliminary study on x-ray source from plasma focus device for fast radiography.** *Nukleonika*, v. 46 (Supplement 1): s123-s125, 2001

[39] YARDANOV, V.; GENOV, D.; IVANOVA, I.; BLAGOEV, A. **Ionization growth in the breakdown of plasma focus discharge.** *Anais do XIII International School of Vacuum, Electron and Ion Technologies*, Varna, Bulgaria, 2004

[40] IVANOV, L.I.; DEDYURIN, A.L.; BOROVITSKAYA, I. V.; KROKHIN, O.N.; NIKULIN, V.Y.; POLUKHIN, S.N.; TIKHOMIROV, A.A. **Material testing with the**

use of plasma focus device. Anais do 31st EPS Conference on Plasma Physics, v. 28, p. 4, 2004

[41] RASPA, V.; SIGAUT, L.; LLOVERA, R.; COBELLI, P.; KNOBLAUCH, P.; VIEYTES, R.; CLAUSSE, A.; MORENO, C. **Plasma focus as a powerful hard X-ray source for ultrafast imaging of moving metallic objects.** Brazilian Journal of Physics, v. 34, n. 4, 2004

[42] THOMAS, R.; YANG, Y.; MILEY, G.H.; MEAD, F.B. **Advancements in dense plasma focus for space propulsion.** AIP Conf. Proc., v. 746, p. 536-543, 2005

[43] GRIBKOV, V.A. **Current and Perspective Applications of Dense Plasma Focus Devices, Plasma and Fusion Science.** Anais do 17th IAEA Technical Meeting on Research Using Small Fusion Devices, AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, v. 996, p. 51-64, 2008.

[44] GRIBKOV, V.A.; CHERNYSHOVAL, M.V.; CICUTIN, A.; CRESPO, M.L.; MIKLASZEWSKI, R.A.; SCHOLZ, M.; SHAPIRO, A.E.; TOMASZEWSKI, K.; TUNIZ, C. **Dense plasma focus “Bora”.** *The Abdus Salam International Centre of Theoretical Physics* and experiments provided with the device, 2008.

[45] LEE, S. **Results of the internet-based workshop on plasma focus numerical experiments.** International Workshop on Plasma Computation & Applications IWPCA2008, Kuala Lumpur, 2008.

[46] LEE, S. **Fusion energy and the plasma focus.** TÜBAV Bilim 1(1) 2008 1-6.

[47] ZAPRYANOV, S.; YORDANOV, V.; BLAGOEV, A. Measurements of the basic characteristics of the dense plasma focus. **Bulg. J. Physics**, v.38, p.184-190, 2011.

[48] SENSOR DE VÁCUO - APG100 Active Pirani Gauge. Disponível em: <<http://www.edwardsvacuum.com/Products/List.aspx?r=124>>. Acesso em: 12/04/2012

[49] HIGASHI, E. M. **Modelagem da bobina de Rogowski para medidas de pulsos de corrente elétrica.** 82 f. – Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

[50] DELBEN, G. J. **Avaliação da resposta da bobina de Rogowski para aplicação em sensor de descargas elétricas em isoladores.** 78 f. – Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

[51] BORGIO, H.; GONZALEZ, L.H.E. **Estudo e desenvolvimento de um protótipo de equipamento de medição baseado na bobina de Rogowski. Como alternativa aos TCS de medição convencionais.** 101 f. Trabalho de Graduação (Projeto Final de Curso II) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

[52] **CT Current Transformer.** Disponível em: <http://www.bergoz.com/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=2>. Acesso em: 10/04/2012.

[53] **NITROGÊNIO E ARGÔNIO: informações técnicas.** Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_007.asp>. Acesso em: 10/04/2012.

[54] **PROPRIEDADES DO AR ATMOSFÉRICO.** Disponível em: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM182/CLIMATIZACAO/apostila/2_PROPRIEDADES%20DO%20AR%20ATMOSFERICO.pdf>. Acesso em: 10/04/2012.

[55] IRWIN, J. D. **Análise de circuitos em engenharia.** 4. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000.

[56] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física, volume 3: eletromagnetismo,** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

[57] ABDOL, A.E.; ISMAIL, M.I.; MOHAMED, A.E.; LEE, S.; SAW, S.H. **Preliminary results for Kansas State University dense plasma focus (KSU-DFP).** Kansas State University, 2010.

[58] **DIVISOR RESISTIVO: para sinais de tensão.** Disponível em: <http://www.tjm.com.br/divisor%20resistivo_N00322.pdf>. Acesso em: 10/04/2012.

ANEXO 1

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA CÉLULA

COMPONENTES	PARÂMETROS		UNIDADE	MATERIAL
	COMPRIMENTO TOTAL	DIÂMETRO INTERNO		
Ânodo	41	(a) 13	mm	Cobre
Cátodo	73	(b) 30	mm	Cobre
Isolador	15	19	mm	Acrílico
Fase axial (z_o)	26	-	mm	-
Espeçura do isolador		4	mm	-

FONTE: O Autor (2012)

ANEXO 2

TABELA 4 – INFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO [53]

GRANDEZA	VALOR	UNIDADE
Massa molecular	28,0134	g/mol
Massa específica do gás (15°C e 1 atm)	1,185	kg/m ³
Idem, na temperatura ebulição e 1 atm	4,614	kg/m ³
Massa específica do líquido na temperatura ebulição em 1 atm	808,607	kg/m ³
Ponto de fusão	-210	°C
Calor de fusão	0,72	kJ/mol
Ponto de ebulição	-195,8	°C
Calor de vaporização	5,58	kJ/mol
Temperatura crítica	-146,9	°C
Pressão crítica	3399,9	kPa
Massa específica crítica	314,03	kg/m ³
Temperatura do ponto tríplice	-210,1	°C
Pressão do ponto tríplice	12,53	kPa
Cp (a 1 atm e 25°C)	0,029	kJ/(mol °C)
Cv (a 1 atm e 25°C)	0,02	kJ/(mol °C)
Relação Cp / Cv (a 1 atm e 25°C)	1,403846	-
Viscosidade a 0°C e 1 atm	0,0001657	-
Condutividade térmica a 0°C e 1 atm	0,024	W/(m °C)
Solubilidade em água a 0°C e 1 atm	0,0234	vol/vol
Velocidade do som (gás a 27°C)	353	m/s
Eletronegatividade	3,04	-
Estados de oxidação	+5 +4 +3 +2 -3	-

ANEXO 3

TABELA 5 – INFORMAÇÕES DO ARGÔNIO [53]

GRANDEZA	VALOR	UNIDADE
Massa molecular	39,948	g/mol
Massa específica do gás (15°C e 1 atm)	1,67	kg/m ³
Idem, na temp ebulição e 1 atm	5,853	kg/m ³
Massa esp do liq na temp ebulição e 1 atm	1392,8	kg/m ³
Ponto de fusão	-189,3	°C
Calor de fusão	1,18	kJ/mol
Ponto de ebulição	-185,8	°C
Calor de vaporização	6,5	kJ/mol
Temperatura crítica	-122,2	°C
Pressão crítica	4898	kPa
Massa específica crítica	537,7	kg/m ³
Temperatura do ponto tríplice	-189,4	°C
Pressão do ponto tríplice	68,7	kPa
C _p (a 100 kPa e 25°C)	0,02	kJ/(mol °C)
C _v (a 100 kPa e 25°C)	0,012	kJ/(mol °C)
Relação C _p / C _v (a 100 kPa e 25°C)	1,664	-
Viscosidade a 0°C e 1 atm	0,0002099	-
Condutividade térmica a 0°C e 1 atm	0,0163	W/(m °C)
Solubilidade em água a 0°C e 1 atm	0,0537	vol/vol
Eletronegatividade	s/ dado	-
Estados de oxidação	0	-

ANEXO 4

TABELA 6 – INFORMAÇÕES DO AR ATMOSFÉRICO SECO [54]

COMPONENTES DO AR PADRÃO	VOLUME (%)	PESO (%)
Nitrogênio	78,09	75,52
Oxigênio	20,95	23,15
Argônio	0,93	1,28
Dióxido de carbono	0,03	0,04
Neônio, Hidrogênio, Hélio, Criptônio, Ozônio, etc.	Traços leves	Traços leves
CONSTANTES DO AR PADRÃO	VALOR	UNIDADE
Temperatura (T)	21,1	°C
Pressão barométrica (P)	101,325	kPa
Aceleração da gravidade normal (g)	9,80665	m/s
Constante de gás para o ar (R)	287	J/Kg °C
Densidade do ar ao nível do mar (ρ_{ar})	1,201	kg/m ³
Calor específico à pressão constante do ar (c_p)	1,0048	kJ/Kg °C
Calor específico a volume constante do ar (c_v)	0,717	kJ/Kg °C
Densidade da água ($\rho_{água}$)	1000	kg/m ³
Calor específico da água líquida (c_{al})	4,19	kJ/Kg °C
Calor latente de vaporização da água líquida (c_{iv})	2,4535. 10 ³	kJ/Kg